



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Instituto de investigaciones Económicas y Empresariales

Maestría en Políticas Públicas

Los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023-2024. Un estudio comparativo de eficiencia técnica y eficiencia técnica sostenible a través del Data Envelopment Analysis (DEA)

T E S I S:

Que para obtener el grado de
Maestro en Políticas Públicas

Presenta:

Lic. Oscar Misael Mota Pérez

Director de tesis:

Dr. José César Lenin Navarro Chávez

Morelia Michoacán, mayo 2026

Agradecimientos

Esta tesis está dedicada en primera instancia a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e innovación (SECIHTI) por el apoyo financiero de la beca de posgrado que permitió llevar a cabo esta investigación y que me hizo posible culminar con mis estudios de maestría.

A mi *alma máter* la Benemérita y Centenaria Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Formadora de seres humanos ilustres como Miguel Hidalgo y Costilla y José María Morelos. Que deja en mí como legado el pensamiento crítico y humanista que pondré al servicio de la sociedad.

De forma particular, al Instituto de Investigaciones Económicas y Empresariales (ININEE) por formarme como maestro en Políticas Públicas desde una visión plural, integradora, comprometida y disciplinada.

A mi director de tesis el Dr. José Cesar Lenin Navarro Chávez por ser un guía ejemplar en mi desarrollo como investigador y conocedor de las Políticas Públicas y apoyarme de forma condicional en el desarrollo de esta investigación, cuya visión de la educación me inspira a seguirme formando y contribuir al proceso de aprendizaje de los demás.

A mi mesa sinodal conformada por el Dr. Carlos Francisco Ortiz Paniagua y la Dra. Odette Virginia Delfin Ortega, quienes además fueron mis profesores durante mi programa de maestría, los cuales compartieron conmigo un sinnúmero de conocimientos, perspectivas y valores en mi formación y cuyos aportes fortalecieron en gran medida esta investigación y con quienes me encuentro infinitamente agradecido.

A mi coordinador el Dr. Félix Chamú Nicanor por todo su apoyo académico y administrativo.

A los profesores que me acompañaron y guiaron durante mi proceso de maestría, el Dr. Plinio, el Dr. René Marín, el Dr. Casimiro Leco, el Dr. Rubén Molina y el Dr. Ayvar Campos. Sus conocimientos compartidos conmigo son invaluable y fundamentales en mi desarrollo académico.

Dedicatoria

A mí madre la Dra. Ma. De Lourdes Pérez Trejo a quien admiro profundamente por su fortaleza, valentía, inteligencia y resiliencia y quien siempre será mi referente, profesional, académico y personal. Agradezco todo su apoyo en mi proceso de maestría y durante toda mi formación.

A mi padre, el Mtro. Francisco Mota Marroquín quien a pesar de no estar físicamente está presente conmigo en todas sus enseñanzas y conocimientos.

A mis hermanos el Mtro. Francisco Mota, la Dra. Cecilia Mota y la Lic. Alejandra Mota, por su increíble esencia y por recordarme que nuestro valor como personas está en nuestra empatía y autenticidad.

A mi familia, mi tía Irma Pérez y mi tío Avelino Chávez, a mis primos la Dra. Ana Laura Chávez y Miguel Chávez. A mi tío Miguel Pérez, a mi tía Adela Pérez. A la señora Rosa López. Por todo su cariño y apoyo.

A la Mtra. Daniela Valenzuela Carreño, por su increíble amistad que es el regalo más grande de mi proceso de maestría, por ser una maestra para mí en todos los aspectos de mi vida cuya paciencia, inteligencia y empatía fueron claves para la culminación de este proceso. Te quiero mucho manix.

Al Dr. Julio César Morán Figueroa, mi ex compañero del consejo y gran amigo, por todas sus enseñanzas, paciencia y cariño a quien debo ser parte de la comunidad ININEE.

A la persona que cambió mi forma de ver la vida y con quien espero construir un gran proyecto de vida juntos el Mtro. Antonio Eduardo Rocha Bravo porque *solo nuestras almas saben qué es lo que está sucediendo* gracias por todo tu amor, paciencia y apoyo. Sin ti, esto no sería posible.

A mis compañeros y amigos de mi grupo de maestría por las risas y su valioso apoyo y compañía, Ángel, Ximena, Omar, Aidé, Paola, Yadira, Gloria, Laura y Guadalupe.

A mis grandes amigas que hice en el INIEE la Mtra. Monserrat Farías y la Dra. Martha Villegas por su increíble compañía, los grandes momentos y su incondicional apoyo. Las quiero bebis.

Al Dr. Juan José Villegas por su apoyo para realizar esta investigación.

A mis grandes amigos Mabel, Lalo, Andrea, Marian, Fernanda, Ivett, Jenni, Paloma, Marlene y Alondra. Por su gran apoyo y cariño durante todos estos años.

Índice

GLOSARIO	8
SIGLAS Y ABREVIATURAS	10
RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS	11
RESUMEN	14
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN	16
 CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	22
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	28
1.2.1 Pregunta general	28
1.2.2 Preguntas específicas	28
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	29
1.3.1 Objetivo general de la investigación	29
1.3.2 Objetivos específicos de la investigación	29
1.4 JUSTIFICACIÓN	30
1.4.1 Trascendencia	30
1.4.2 Conveniencia	30
1.4.3 Relevancia social	31
1.4.4 Implicaciones prácticas	31
1.4.5 Valor teórico	32
1.4.6 Utilidad metodológica	32
1.4.7 Horizonte espacial y temporal	32
1.4.8 Viabilidad de la investigación	33
1.5 TIPOS DE INVESTIGACIÓN	33
1.5.1 Descriptivos	33
1.5.2 Exploratorios	33
1.5.3 Correlacionales	34
1.5.4 Explicativos	34
1.6 RESUMEN CRÍTICO	34
1.6.1 Teorías que sustentan académicamente la investigación	34
1.6.2 Diagrama sagital	35
1.7 MÉTODO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	36
1.7.1 Método	36
1.7.2 Metodología de la investigación	37
1.8 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	37
1.8.1 Hipótesis general	37
1.8.2 Hipótesis específicas	37
1.9 OPERACIONALIZACIÓN	38
1.9.1 Variables	38
1.9.2 Instrumentos	39

1.10 UNIVERSO Y OBJETO DE ESTUDIO	40
1.10.1 Universo	40
1.10.2 Objetos de estudio	40
1.11 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	40

CAPÍTULO 2: EL TRANSPORTE PÚBLICO Y EL ESTADO ACTUAL DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO FERROVIARIO URBANO DE MÉXICO..... 41

2.1 INTRODUCCIÓN.....	41
2.2 PANORAMA GENERAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO	41
2.2.1 La relación del transporte público con la economía.....	50
2.2.2 Evolución del transporte público.....	53
2.2.3 Relación del transporte público con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	55
2.3 ESTADO ACTUAL DEL TRANSPORTE PÚBLICO EN MÉXICO	59
2.3.1 Oferta de transporte público en México	60
2.3.2 Marco normativo de la movilidad urbana en México	61
2.3.3 Marco de políticas de movilidad urbana y transporte público en México	65
2.3.4 Estado de la movilidad urbana en Ciudad de México, Nuevo León y Jalisco	72
2.4 SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO FERROVIARIO URBANO DE MÉXICO.....	74
2.4.1 Desempeño general de los sistemas transporte público ferroviario urbano en México	77
2.4.2 Revisión de los insumos de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de México.....	81

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO 88

3.1 INTRODUCCIÓN.....	88
3.2 PRODUCTIVIDAD, EFICIENCIA Y EFICACIA.....	88
3.3 NOCIONES TEÓRICO-CONCEPTUALES DE LA EFICIENCIA Y SUS TIPOS	91
3.3.1 Eficiencia técnica	94
3.3.2 Eficiencia asignativa	98
3.4 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA EFICIENCIA.....	101
3.4.1 Métodos de no frontera	101
3.4.2 Métodos de frontera	102
3.5 EL ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS (DEA)	106
3.5.1 El modelo DEA de Charnes, Cooper y Rhodes (CCR).....	108
3.5.2 El modelo DEA de Banker, Charnes y Cooper (BCC).....	113
3.5.3 Eficiencia técnica global, eficiencia técnica pura, eficiencia a escala y rendimientos a escala.....	116
3.5.4 Los modelos de referencias o <i>Benchmarking</i>	119
3.5.6 Análisis de holguras o <i>slacks</i>	120
3.5.7 Incorporación de productos no deseados	122
3.5.8 Ventajas y limitaciones del DEA.....	127
3.6 LA EFICIENCIA TÉCNICA SOSTENIBLE, UNA REVISIÓN CONCEPTUAL.....	129

CAPÍTULO 4: REVISIÓN TEÓRICA DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS	131
4.1 INTRODUCCIÓN.....	131
4.2 CONCEPTUALIZACIÓN DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS	131
4.3 EL ORIGEN DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS.....	133
4.4 EL CICLO DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS	134
4.5 LA DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	137
4.6 EL DISEÑO DE POLÍTICAS	139
4.7 IMPLEMENTACIÓN DE LAS POLÍTICAS	141
4.8 LA EVALUACIÓN DE LAS POLÍTICAS PÚBLICAS	142
 CAPÍTULO 5: LA EFICIENCIA A TRAVÉS DEL DEA EN LOS SISTEMAS PÚBLICOS DE TRANSPORTE URBANO Y LA POLÍTICA PÚBLICA. EVIDENCIA EMPÍRICA..	 145
5.1 INTRODUCCIÓN.....	145
5.2 ESTUDIOS GENERALES DE LA EFICIENCIA EN EL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO	146
5.3 ESTUDIOS DE LA EFICIENCIA EN SISTEMAS FERROVIARIOS URBANOS	152
5.4 ESTUDIOS DE EFICIENCIA INTERNA DE LOS SISTEMAS FERROVIARIOS URBANOS.....	155
5.5 LA POLÍTICA PÚBLICA EN LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO FERROVIARIO URBANO.....	159
 CAPÍTULO 6: DESARROLLO METODOLÓGICO.....	 171
6.1 INTRODUCCIÓN.....	171
6.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DEA	171
6.3 SELECCIÓN DE LAS UNIDADES DE TOMA DE DECISIÓN (DMUs).....	173
6.4 ESPECIFICACIÓN DE LOS INSUMOS, PRODUCTOS Y PRODUCTO NO DESEADO EMPLEADOS EN EL MODELO.....	174
6.5 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS E INSTRUMENTOS	181
6.6 ESPECIFICACIÓN DE LOS MODELOS DEA.....	184
6.7 CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS Y LIMITACIONES	187
 CAPÍTULO 7: RESULTADOS	 188
7.1 INTRODUCCIÓN.....	188
7.2 RESULTADOS DEL MODELO DE EFICIENCIA TÉCNICA CON RENDIMIENTOS CONSTANTES A ESCALA	188
7.2.1 Referencias <i>benchmarking</i> modelo de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS)	191
7.2.2 Análisis de holguras (<i>slacks</i>) modelo de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS).	193
7.3 RESULTADOS DEL MODELO DE EFICIENCIA TÉCNICA RENDIMIENTOS VARIABLES A ESCALA (VRS)	195
7.3.1 Referencias <i>benchmarking</i> del modelo de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS)	197
7.3.2 Análisis de holguras (<i>slacks</i>) del modelo de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS)	199
7.4 RESULTADOS DE LA EFICIENCIA DE ESCALA DEL MODELO DE EFICIENCIA TÉCNICA	201
7.5 SÍNTESIS Y DISCUSIÓN DE LOS MODELOS DE EFICIENCIA TÉCNICA	202
7.6 RESULTADOS DEL MODELO DE EFICIENCIA TÉCNICA SOSTENIBLE CONSIDERANDO RENDIMIENTOS CONSTANTES A ESCALA (CRS).....	207

7.6.1 Referencias <i>benchmarking</i> del modelo de eficiencia técnica sostenible con rendimientos constantes a escala (CRS)	210
7.6.2 Análisis de holguras (<i>slacks</i>) del modelo de eficiencia técnica sostenible con rendimientos constantes a escala (CRS)	212
7.7 RESULTADOS DEL MODELO DE EFICIENCIA TÉCNICA SOSTENIBLE CONSIDERANDO RENDIMIENTOS VARIABLES A ESCALA (VRS)	214
7.7.1 Referencias <i>benchmarking</i> modelo de eficiencia técnica sostenible con rendimientos variables a escala (VRS)	216
7.7.2 Análisis de holguras (<i>slacks</i>) del modelo de eficiencia técnica sostenible con rendimientos variables a escala (VRS)	218
7.8 EFICIENCIA DE ESCALA DEL MODELO DE EFICIENCIA TÉCNICA SOSTENIBLE	220
7.9 DISCUSIÓN DEL MODELO DE EFICIENCIA TÉCNICA SOSTENIBLE Y SU CONTRASTE CON EL MODELO DE EFICIENCIA TÉCNICA	222

CAPÍTULO 8: EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO FERROVIARIO URBANO EN MÉXICO. PROPUESTA DE POLÍTICA PÚBLICA..... 228

8.1 INTRODUCCIÓN	228
8.2 FUNDAMENTOS DE LA PROPUESTA DENOMINADA “PROGRAMA PARA LA EVALUACIÓN Y OPERACIÓN EFICIENTE Y SOSTENIBLE DE LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO FERROVIARIO URBANO EN MÉXICO”	228
8.3 EJE 1: INSTITUCIONALIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA DEA PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA	231
8.4 EJE 2: PLANIFICACIÓN PARA LA INVERSIÓN ESTRATÉGICA EN TRANSPORTE BASADA EN RESULTADOS	234
8.5 EJE 3: IMPLEMENTACIÓN DE TICS PARA EL MEJORAMIENTO DE LA RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	241

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.. 244

CONCLUSIONES	244
RECOMENDACIONES	250
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	251

REFERENCIAS..... 253

ANEXOS..... 275

Glosario

Análisis envolvente de datos: Modelo de programación matemática aplicada a un conjunto de datos observados que provee una forma de obtener relaciones empíricas estimadas como la frontera de producción o las superficies eficientes de las posibilidades de producción (Charnes *et al.*, 1978; Cooper *et al.*, 2011b).

Benchmarking: La evaluación y el análisis de procesos, productos o servicios, con la finalidad de establecer una comparación, la cual permita determinar un punto de referencia que posibilite guiar estrategias de gestión de una Unidad de Toma de Decisión (Guevel *et al.*, 2025).

Eficiencia técnica pura: Condición de una Unidad de Toma de Decisión para maximizar la generación de productos a partir de un nivel determinado de insumos, o bien, minimizar la cantidad de insumo consumido conservando los mismos niveles de producción dada su capacidad de gestión considerando Rendimientos Variables a Escala (VRS) (Coelli *et al.*, 2005).

Eficiencia técnica global: Condición de una Unidad de Toma de Decisión en relación con su uso óptimo de los recursos que se compone de la Eficiencia Técnica Pura, así como de la Eficiencia de Escala. Se determina a través de la medición de eficiencia considerando Rendimientos Constantes a Escala (CRS) (Thanassoulis, 2001).

Eficiencia de escala: Evalúa si una Unidad de Toma de Decisión opera en el tamaño óptimo. Se obtiene como el cociente de su nivel de Eficiencia Técnica Global sobre su nivel de Eficiencia Técnica Pura.

Permite identificar si la DMU tiene economías o deseconomías de escala (Thanassoulis, 2001).

Eficiencia técnica sostenible: Un componente de la eficiencia económica sostenible que evalúa el desempeño del proceso productivo de un sistema (sin considerar la eficiencia de asignación) dada la maximización de los productos deseados, o bien, la minimización de insumos y de los elementos no deseados, siempre y cuando se incorpore algún indicador relacionado con una o más dimensiones complementarias del desarrollo sostenible como lo pueden ser la ambiental o la social.

Holguras (*slacks*): Persistencia de condiciones de ineficiencia aun cuando se ha realizado el ajuste proporcional a partir de las ponderaciones del modelo DEA. Retrata excesos no proporcionales en la cantidad de insumos consumidos o bien déficit en la generación de los productos (Zamora, 2018).

Transporte público: Servicios de transporte que son compartidos por la población en general que tiene rutas, frecuencias y horarios establecidos, donde el usuario no es el dueño del medio de transporte ni existe un contrato previo con el prestador del servicio y, que puede ser ofertado a través medios de transporte en una zona determinada como lo puede ser la urbana (Vuchic, 2007).

Transporte público ferroviario urbano: El transporte público ferroviario urbano es un servicio de transporte público instalado en áreas de alta demanda que tiene un derecho de vía exclusivo o semi exclusivo operando sobre vías férreas a altas frecuencias con Unidades de Transporte de alta capacidad conformadas por varios vehículos que integran una unidad operativa conocida como tren (Ortúzar y Willumsen, 2011; Vuchic, 2007).

Siglas y abreviaturas

APTA	American Public Transport Association
BCC	Banker, Charnes and Cooper
Cap.	Capacidad de la flota
CCR	Charnes, Cooper and Rhode
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CRS	Rendimientos Constantes a Escala
DEA	Análisis Envolvente de Datos
DMU	Unidades de Toma de Decisión
Emi.	Emisiones indirectas de GEI
ENCIG	Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental
ENAMOV	Estrategia Nacional de Movilidad y Seguridad Vial
Est.	Número de estaciones
Fre.	Frecuencias semanales planificadas
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IMCO	Instituto Mexicano Para la Competitividad
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
Pas.	Pasajeros transportados
PNTPCU	Política Nacional de Transporte Público Colectivo Urbano
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEDATU	Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
SITEUR	Sistema de Tren Eléctrico Urbano
STC (Metro)	Sistema de Transporte Colectivo Metro
STC (Metrorrey)	Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey
TIC	Tecnologías de la Información y Comunicación
UITP	Unión Internacional de Transporte Público
UNESCWA	United Nations Economic and Social Commission for West Asia
VRS	Rendimientos Variables a Escala

Relación de tablas y figuras

Relación de tablas

Tabla 2.1	45
<i>Clasificaciones de los sistemas de transporte público urbano</i>	45
Tabla 2.2	47
<i>Características de los tipos de transporte ferroviario urbano</i>	47
Tabla 2.3	60
<i>Modos de transporte público en México con base en información de 2020</i>	60
Tabla 2.4	71
<i>Objetivos de la PNTPCU alineados con esta investigación</i>	71
Tabla 2.5	73
<i>Resultados generales del ranking elaborado con el índice de movilidad urbana y sus subíndices de las zonas urbanas de México donde se oferta el servicio de tren de pasajeros</i>	73
Tabla 2.6	75
<i>Características demográficas y espaciales de las zonas metropolitanas donde existen sistemas de transporte urbano ferroviario del año 2020</i>	75
Tabla 2.7	81
<i>Líneas y estaciones del Sistema de Transporte Colectivo (Metro)</i>	81
Tabla 3.1	127
<i>Ventajas y limitaciones de los modelos DEA</i>	127
Tabla 6.1	173
<i>Nomenclatura y presentación de la Unidades de Toma de Decisión elegidas</i>	173
Tabla 6.2	175
<i>Insumos y productos seleccionados para el enfoque de eficiencia técnica (sin variable ambiental)</i>	175
Tabla 6.3	175
<i>Insumos y productos seleccionados para el enfoque de eficiencia técnica sostenible con variable ambiental</i>	175
Tabla 6.4	182
<i>Fuentes de información sobre el Sistema de Transporte Colectivo (Metro)</i>	182
Tabla 6.5	182
<i>Fuentes de información sobre el Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR)</i>	182
Tabla 6.6	183
<i>Fuentes de información sobre el Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey)</i>	183
Tabla 7.1	189
<i>Resultados del modelo DEA de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS), 2023 y 2024</i>	189
Tabla 7.2	192
<i>Benchmarking del modelo DEA de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS) 2023 – 2024</i> ...	192
Tabla 7.3	194
<i>Análisis de holguras (slacks) del modelo de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS) 2023-2024</i>	194
Tabla 7.4	196
<i>Resultados del modelo DEA de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS), 2023 y 2024</i>	196
Tabla 7.5	197
<i>Benchmarking del modelo DEA de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS) 2023 – 2024</i>	197
Tabla 7.6	199
<i>Análisis de holguras (slacks) del modelo de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS)</i>	199
Tabla 7.7	201
<i>Resultado de la eficiencia a escala del modelo de eficiencia técnica 2023-2024</i>	201
Tabla 7.8	208
<i>Resultados del modelo DEA de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos constantes a escala (CRS), 2023 y 2024</i>	208
Tabla 7.9	210

<i>Benchmarking del modelo DEA de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos constantes a escala (CRS) 2023 y 2024</i>	210
Tabla 7.10	212
<i>Análisis de holguras (slacks) del modelo de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos constantes a escala (CRS)</i>	212
Tabla 7.11	214
<i>Resultados del modelo DEA de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos variables a escala (VRS), 2023 y 2024</i>	214
Tabla 7.12	216
<i>Benchmarking del modelo DEA de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos variables a escala (VRS) 2023 y 2024</i>	216
Tabla 7.13	218
<i>Análisis de holguras (slacks) del modelo de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos variables a escala (VRS)</i>	218
Tabla 7.14	220
<i>Resultado de la eficiencia a escala del modelo de eficiencia técnica sostenible 2023-2024</i>	220
Tabla 8.1	230
<i>Resumen crítico del Programa para la evaluación y operación eficiente y sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México</i>	230

Relación de figuras

Figura 1.1	25
<i>Nivel de percepción de eficiencia de los servicios de transporte público urbano: comparación entre países líderes, principales países de América Latina y México en 2024</i>	25
Figura 1.2	26
<i>Porcentaje de aceptación ciudadana de los principales modos de transporte público y masivo en México en 2023</i>	26
Figura 1.3	36
<i>Diagrama sagital de la investigación</i>	36
Figura 2.1	59
<i>Porcentaje de la población en México que tiene acceso al transporte público por entidad federativa para el año 2020</i>	59
Figura 2.2	74
<i>Porcentaje de la población que se encuentra satisfecha con los servicios de transporte público ferroviario urbano en los años 2015 - 2023 en las entidades que ofrecen este servicio</i>	74
Figura 2.3	78
<i>Cantidad anual de usuarios de los sistemas de transporte público ferroviario urbano que se están analizando durante el año 2010 –2024</i>	78
Figura 2.4	80
<i>Uso real de los sistemas de transporte público ferroviario urbano que se están analizando medido en Kilómetros recorridos durante el año 2010-2024</i>	80
Figura 2.5	83
<i>Mapa de la red del Sistema de Transporte Colectivo (Metro) de la Ciudad de México</i>	83
Figura 2.6	84
<i>Mapa de la red del Sistema de Tren Eléctrico Urbano de la ciudad de Guadalajara</i>	84
Figura 2.7	84
<i>Mapa de la red del Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) de la ciudad de Monterrey</i>	84
Figura 2.8	85
<i>Cantidad de unidades de transporte (trenes) de los sistemas de transporte público ferroviario urbano que se están analizando, promedio anual 2010-2024</i>	85
Figura 2.9	87
<i>Número de viajes diarios programados en total de los sistemas de transporte público ferroviario urbano analizados con referencia a 2024</i>	87
Figura 3.1	90

<i>Representación de la productividad y eficiencia.....</i>	<i>90</i>
Figura 3.2.....	96
<i>Representación gráfica de la eficiencia técnica</i>	<i>96</i>
Figura 3.3.....	100
<i>Representación gráfica de la eficiencia asignativa</i>	<i>100</i>
Figura 3.4.....	117
<i>Representación gráfica de la frontera con CRS y la frontera con VRS.</i>	<i>117</i>
Figura 3.5.....	122
<i>Medición de la eficiencia y holguras en los insumos.....</i>	<i>122</i>
Figura 4.1.....	137
<i>El ciclo de las políticas públicas.....</i>	<i>137</i>
Figura 4.2.....	140
<i>Relaciones causa-efecto de las políticas.....</i>	<i>140</i>
Figura 5.1.....	165
<i>Ciclo sostenible de las operaciones de los sistemas de transporte público ferroviario urbano.....</i>	<i>165</i>
Figura 5.2.....	168
<i>Priorización de los activos usando múltiples criterios</i>	<i>168</i>

Resumen

Los sistemas de transporte público ferroviario urbano han sido reconocidos como una modalidad de transporte estratégica para alcanzar la movilidad sostenible. Por lo tanto, la presente investigación tiene como objetivo explicar cómo el capital móvil, el capital fijo, la capacidad operativa, el volumen anual de demanda y las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) anuales, determinaron la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023- 2024. Para ello, se realizaron modelos de *Data Envelopment Analysis* (DEA) con dos enfoques, uno de eficiencia técnica sin considerar variables ambientales, y otro de eficiencia técnica sostenible considerando una variable ambiental. En ambos enfoques, se contempló una orientación hacia los productos, se efectuaron modelos con rendimientos constantes CRS, rendimientos variables a escala VRS y se calculó la eficiencia a escala. Las Unidades de Toma de Decisión seleccionadas fueron las 12 líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México, las 3 líneas del Sistema de Tren Eléctrico Urbano de la ciudad de Guadalajara, y las líneas 1 y 2-3 del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey de la ciudad de Monterrey. Los insumos seleccionados fueron capacidad de la flota, número de estaciones, frecuencias semanales planificadas. El producto consistió en el número de pasajeros transportados y el producto no deseado ambiental consistió en las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero por consumo eléctrico.

Los resultados de los modelos revelan un comportamiento heterogéneo entre los sistemas analizados, así como de manera interna. Las líneas que mantuvieron el mejor desempeño integral fueron la línea 2 del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México y la línea 3 del Sistema de Tren Eléctrico Urbano de la ciudad de Guadalajara. El modelo de eficiencia técnica sostenible resultó complementario al modelo operativo simple, pues las DMUs logran mejorar sus niveles de eficiencia. La investigación concluye que la metodología y la selección de insumos y productos pueden ser una herramienta adecuada en el estudio de la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de manera desagregada con la finalidad de construir propuestas de política pública de movilidad sostenible.

Palabras clave: Transporte público ferroviario urbano, eficiencia técnica, *Data Envelopment Analysis*, movilidad sostenible.

Abstract

Urban rail public transport systems have been recognized as a strategic mode of transportation for achieving sustainable mobility. Therefore, this study aims to explain how rolling stock, fixed capital, operational capacity, annual demand volume, and indirect annual greenhouse gas (GHG) emissions determine technical efficiency and sustainable technical efficiency in urban rail public transport systems in Mexico during the period 2023–2024. To this end, Data Envelopment Analysis (DEA) models were applied under two approaches: one measuring technical efficiency without environmental variables, and another assessing sustainable technical efficiency incorporating an environmental variable. In both approaches, an output-oriented perspective was adopted, including models with constant returns to scale (CRS), variable returns to scale (VRS), and scale efficiency estimation.

The decision-making units (DMUs) selected were the 12 lines of the Mexico City Metro system, the 3 lines of the Guadalajara Urban Electric Train System, and lines 1 and 2–3 of the Monterrey Metro system (Metrorrey). The inputs considered were fleet capacity, number of stations, and planned weekly service frequencies. The desirable output was the number of passengers transported, while the undesirable environmental output consisted of indirect GHG emissions derived from electricity consumption.

The results reveal heterogeneous performance across and within the analyzed systems. The lines with the best overall performance were Line 2 of the Mexico City Metro and Line 3 of the Guadalajara Urban Electric Train System. The sustainable technical efficiency model proved to be complementary to the conventional operational model, as the DMUs improved their efficiency levels when environmental factors were incorporated.

The study concludes that the methodology, along with the selection of inputs and outputs, constitutes an appropriate tool for analyzing both technical efficiency and sustainable technical efficiency in urban rail public transport systems at a disaggregated level, with the aim of supporting the design of sustainable mobility public policy proposals.

Keywords: Urban rail public transport, technical efficiency, Data Envelopment Analysis, sustainable mobility.

Introducción

El transporte público urbano resulta un componente primordial para la infraestructura de las ciudades, permitiendo la movilidad de personas y bienes. Bajo condiciones de eficiencia funciona como un catalizador para el crecimiento económico y la reducción de emisiones, en especial de los automóviles privados, lo cual de forma general contribuye al bienestar de las zonas urbanas. No obstante, el desarrollo de modelos eficientes de transporte público continúa siendo un reto a nivel mundial (Lako y Gjevori, 2023).

De acuerdo con el Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo (PNUD, 2025), los servicios de transporte público pueden influir en la reducción del consumo energético, de la congestión vehicular, así como en la generación de nuevos empleos y beneficios financieros en torno a la salud pública, características que se encuentran alineadas con múltiples Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (Organización de las Naciones Unidas, 2015).

La *International Association of Public Transport* o en español la Unión Internacional de Transporte Público (UITP, 2023) vincula este servicio desde el enfoque de la movilidad urbana con el Objetivo 11 de Desarrollo Sostenible “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” (Naciones Unidas, 2015, p.16), mientras que en relación con la accesibilidad universal con el objetivo 10 “Reducir la desigualdad en los países y entre ellos” (Naciones Unidas, 2015, p.16), así como con el crecimiento económico señalado en el objetivo 8 “Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos” (Naciones Unidas, 2015, p.16). No obstante, para lograr una movilidad que cumpla con los Objetivos de Desarrollo Sostenible es imperante considerar que las políticas de transporte público optimicen los sistemas de transporte mejorando su eficiencia y reduciendo sus emisiones de forma simultánea (Gallo y Marinelli, 2020).

Distintas zonas urbanas de México enfrentan importantes desafíos en torno a la eficiencia de los servicios de transporte público, los cuales se encuentran asociados a problemas de infraestructura y gestión (López-Domínguez *et al.*, 2024). Esto queda retratado en los datos reportados por el Foro

Económico Mundial (2024), en el cual México tiene niveles de percepción de eficiencia del transporte público urbano por debajo de países de América Latina y el Caribe (ALC) como Chile, Argentina y Colombia.

Los sistemas de transporte público ferroviario urbano tienen un papel fundamental en el crecimiento económico y desarrollo sostenible de las ciudades debido a su capacidad, velocidad, seguridad y confiabilidad, lo cual lo ha llevado a ser el modo de transporte predilecto en las políticas de transporte público urbano (Chang-fu y Yuan, 2011). Sin embargo, debido a los elevados costos de la infraestructura y de operación, estos sistemas pueden enfrentarse a cuellos de botella, lo cual se traduce en la minimización de los beneficios potenciales incluyendo la dimensión ambiental (Li y Yin, 2012). De igual forma, la eficiencia y la calidad de operación de los sistemas de tren urbano inciden en la percepción de calidad de los usuarios y de manera consecuente en su demanda Awad *et al.* (2023).

En México existen cuatro sistemas de transporte público ferroviario urbano distribuidos en 20 líneas (Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, 2024), los cuales se encuentran conformados principalmente por el Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metro de la Ciudad de México, el Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) de la ciudad de Guadalajara y el Sistema de Transporte Colectivo (STC) Metrorrey de la ciudad de Monterrey. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2025) los sistemas de transporte público ferroviario urbano reportaron entre 2023 y 2024 un total de 2,755 millones de pasajeros transportados haciéndose importante considerar la percepción de calidad de estos servicios.

De acuerdo con la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental estos sistemas cuentan con índices de aprobación heterogéneos, ya que mientras el SITEUR cuenta con niveles de satisfacción de los usuarios del 91.3%, el STC (Metrorrey) cuenta con sólo el 67.9%, mientras que el STC (Metro) con el 49.9% (INEGI, 2024).

El diagnóstico anterior retrata la necesidad de evaluar las condiciones de la eficiencia dado que este elemento es un factor pilar de la percepción, demanda y persistencia de uso de estos servicios de transporte público. Lo cual lleva a plantear el siguiente objetivo de investigación: ¿Cómo el

capital móvil, el capital fijo, la capacidad operativa, la cantidad anual de pasajeros transportados y las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) anuales determinaron la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano, 2023 - 2024?

Se empleó el *Data Envelopment Analysis*, la cual es una metodología de frontera no paramétrica, se planteó un enfoque hacia la evaluación de la eficiencia técnica y otro hacia la eficiencia técnica sostenible, misma que incluye una variable ambiental. Se emplearon como insumos la capacidad de la flota, el número de estaciones y las frecuencias semanales planificadas. El producto considerado fue el volumen anual de pasajeros transportados y el producto ambiental no deseado consistió en emisiones indirectas de GEI por consumo eléctrico. Para ambos enfoques se calcularon la eficiencia técnica pura la cual se obtiene a partir de rendimientos variables a escala (VRS), así como la eficiencia técnica global obtenida con rendimientos constantes a escala (CRS) y la eficiencia a escala que es una combinación de las anteriores.

Las Unidades de Toma de Decisión consideradas fueron: las 12 líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC [METRO]) de la Ciudad de México, las 3 líneas del Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) de la ciudad de Guadalajara, así como las líneas 1 y 2-3 del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey (STC[Metrorrey]) de la ciudad de Monterrey estudiadas en los años 2023 y 2024.

Para llevar a cabo esta investigación se planteó la siguiente hipótesis general: el capital móvil, el capital fijo, la capacidad operativa, el volumen anual de demanda y las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero anuales, fueron los principales factores que determinaron la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023 y 2024.

La problemática de la investigación, así como sus particularidades metodológicas y epistemológicas, son descritas en el primer capítulo del documento, en el cual se comparten las preguntas, objetivos e hipótesis de la investigación. De igual manera se argumenta la pertinencia y relevancia de esta, así como sus alcances y limitaciones.

El capítulo segundo tiene como objetivo realizar una revisión de las definiciones, características y elementos principales que conforman al transporte público. Se hizo una revisión sobre la relación del transporte público con la economía y los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030, así como una retrospectiva de la evolución de los sistemas de transporte público a nivel global. En el segundo apartado se describió el estado general del transporte público en México, considerando su accesibilidad, competitividad, el marco jurídico y de políticas de la movilidad. Finalmente, el último apartado estuvo enfocado en exponer las condiciones productivas que moldearon los sistemas de transporte público ferroviario urbano durante el periodo 2010-2024.

En el capítulo tercero se presentan los fundamentos teóricos de esta investigación, en primer lugar, se hace una revisión del concepto de productividad, en seguida se hace una retrospectiva histórica sobre los principales antecedentes teóricos de la eficiencia. En un siguiente apartado se realizan las precisiones teóricas-metodológicas de la eficiencia técnica, asignativa y económica. La segunda mitad del capítulo se encuentra enfocada en la descripción y fundamentación de la metodología empleada en esta investigación la cual es el Análisis Envolvente de Datos (DEA), por último, se mencionan sus principales variaciones, componentes, ventajas y desventajas.

El capítulo cuarto tiene como propósito establecer los fundamentos teóricos del análisis de las políticas públicas, abordando sus principales definiciones, su evolución histórica, el ciclo de las políticas públicas, así como sus elementos centrales como la identificación del problema, el diseño, la implementación y la evaluación, con el fin de proporcionar un marco conceptual que sustente el análisis desarrollado en los capítulos posteriores.

Por otra parte, el quinto capítulo está dedicado a la síntesis de los artículos más relevantes en torno al tema de estudio. Estas investigaciones previas aportan miradas metodológicas que pueden enriquecer el presente estudio, así como a dilucidar el comportamiento del fenómeno que se está analizando. De manera adicional, en el último apartado de este capítulo, se presentan ejemplos y recomendaciones de políticas en la movilidad, en el transporte público y en específico del transporte público ferroviario urbano. Se abordan, en un primer momento en este capítulo, los estudios pioneros en el empleo de la metodología DEA en los sistemas de transporte público a los

que se les incorpora investigaciones contemporáneas. Se incluyen trabajos que analizan distintos sistemas de transporte, así como estudios multisistema. La segunda parte del capítulo se enfoca en investigaciones particulares a los sistemas de transporte público ferroviario urbano. Para agilizar la lectura del capítulo se recomienda referirse a los anexos donde se comparte una tabla que sintetiza la información contenida en este capítulo. Por último, en este capítulo se presentan las políticas públicas y recomendaciones de gestión en relación con los sistemas de transporte público ferroviario urbano.

En el capítulo sexto se presentan las particularidades metodológicas de la investigación, así como su justificación. La elección de las variables y sus características partió de la revisión de los antecedentes teóricos y empíricos que fueron presentados en los capítulos anteriores. Se realizaron adecuaciones correspondientes de acuerdo con los objetivos y enfoque de este trabajo. Los modelos empleados son el *Data Envelopment Analysis* (DEA), que es de carácter no paramétrico y de frontera (DEA), contemplando como Unidades de Toma de Decisión (DMUs) las 17 líneas de los sistemas de tren urbano de pasajeros de México y su desempeño en los años 2023 y 2024. En el penúltimo apartado se puede encontrar la especificación técnica del modelo.

El capítulo séptimo tiene como objetivo presentar los resultados de los modelos DEA de eficiencia técnica (sin variable ambiental) y eficiencia técnica sostenible con rendimientos constantes (CRS) y con rendimientos variables (VRS), así como su respectivo análisis de referencia (*benchmarking*) y de holguras (*slacks*) para las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de México seleccionados para los años 2023 y 2024.

En el capítulo octavo, se presenta una propuesta de política pública cuyo objetivo se encuentra orientado a fortalecer la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de México analizados a lo largo de esta investigación. La propuesta se hace en función de los resultados de análisis empírico que fueron obtenidos a través de los distintos modelos del Análisis Envolvente de Datos (DEA), en específico con base en las holguras y análisis de referencias (*benchmarking*). La propuesta se ha realizado en función de los lineamientos normativos y de política pública que están relacionados con las variables empleadas en los modelos. La propuesta se encuentra estructurada por tres ejes principales: el primero

orientado a la instrumentalización de la metodología DEA en la evaluación del desempeño de los sistemas; el segundo orientado a la planificación basada en evidencia considerando los insumos, productos y producto no deseado y; el tercero orientado a la implementación de Tecnologías de la Información y Comunicación que permitan una mejor gestión de los sistemas.

En el último apartado de la investigación se concluye que el *Data Envelopment Analysis* (DEA) así como la selección de insumos, productos y productos no deseados, es una herramienta que permite evaluar de manera adecuada el desempeño de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México desde la perspectiva de la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible, validando así la hipótesis general de esta investigación. En este sentido, los resultados obtenidos, a través de los distintos modelos, muestran que las líneas mejor evaluadas fueron la línea 2 del STC (Metro) de la Ciudad de México y la línea 3 del SITEUR de la ciudad de Guadalajara. En contraste, la línea 6 del STC (Metro) de la Ciudad de México obtuvo niveles bajos persistentes de eficiencia técnica pura en ambos enfoques. A través del enfoque de eficiencia técnica sostenible se observa que todas las líneas del SITEUR y del STC (Metrorrey) de la ciudad de Monterrey se convierten en eficientes, por otra parte, en ambos enfoques, el STC (Metro) muestra un comportamiento heterogéneo entre las líneas y también de forma temporal, lo que retrata importantes áreas de oportunidad y de mejora en su gestión. Lo anterior hace visible la necesidad de políticas públicas cuyo propósito esté orientado a la medición y mejora de la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de estos sistemas.

Capítulo 1

Fundamentos de la investigación

1.1 Planteamiento del problema

La investigación científica inicia estableciendo el problema de investigación. Arias-Castrillón (2020) argumenta que el primer paso para definir un problema de investigación es la descripción de un problema de la realidad para después cruzar por un proceso de reducción y focalización con la finalidad de encontrar un vacío o bien una nueva versión para explorar la problemática. Por lo que a continuación se plantea el problema de la presente indagatoria.

En un documento publicado por el Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo (ITDP por sus siglas inglés) señala que de no mejorar el estado del transporte público urbano en México se seguirá incrementando el uso de los automóviles privados motorizados los cuales son responsables del 50 % de los viajes urbanos de pasajeros con una tendencia del 25 % al alza en términos de kilómetros por persona (Fulton *et al.*, 2024).

Los principales impactos negativos de las tendencias de movilidad privada residen en el aumento de víctimas mortales en accidentes viales, incremento en la brecha de movilidad que puede agudizar la desigualdad económica, disminución en la calidad atmosférica de las ciudades que lleva a al incremento de los costos sanitarios. De igual forma mientras persistan estas modalidades de transporte continuará la alta demanda de inversión pública en vías primarias urbanas y el crecimiento de las zonas suburbanas lo que limitaría el desarrollo compacto e incrementaría las distancias de traslado sobre todo de zonas más rezagadas (Fulton *et al.*, 2024).

Los fallos de mercado son una de las principales consideraciones que deben tener los hacedores de políticas al momento de implementarlas, en el caso del transporte, una de las externalidades negativas que se manifiestan en mayor medida es la congestión vehicular (Klotz *et al.*, 2017). Un estudio elaborado por Cravioto *et al.* (2013) arrojó que los costos externos del transporte en México representan cerca del 6.24% del Producto Interno Bruto (PIB) de México. Donde los accidentes vehiculares representaron la mayor parte de estas pérdidas, seguido de la congestión vehicular (22%) la emisión de Gases de Efecto Invernadero (21%), la contaminación del aire (13%). El Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO, 2019) valúo las pérdidas producto de la congestión en 94 mil millones de pesos anuales.

Como se pudo observar la congestión vehicular es un problema serio en las principales ciudades mexicanas, en el ranking elaborado por la compañía TomTom (2025) en 2024 la Ciudad de México ocupó el primer lugar en congestión vehicular¹ con un 52% de congestión. En cuestión a los tiempos de traslado por cada 10 kilómetros la Ciudad de México ocupó el lugar número 17 a nivel mundial, le siguen la ciudad de Puebla en el puesto 36, Guadalajara en el puesto 65 y León en el puesto 69.

La problemática de esta investigación se centra en que los países de ingreso medio el transporte público posee las características de un bien inferior ya que si el ingreso de las personas mejora y pueden costear el cambio de transporte público al privado lo harán tan pronto sea posible, esto debido a que en la mayoría de este tipo de economías el transporte público carece de seguridad, comodidad y confiabilidad (Ruiz *et al.*, 2023). Por lo tanto, el IMCO (2019a) señala que se requiere de una mayor inversión en transporte público urbano ya que en México se destina apenas el 1.2% del presupuesto en movilidad siendo que este tipo de sistemas son empleados por el 39% de la población, en contraste, para el automóvil se destina el 42% de presupuesto público de movilidad siendo utilizado por únicamente el 25% de la población, lo que retrata un desequilibrio importante en la inversión pública de movilidad en México. Sin embargo, es también importante señalar que un aumento en el gasto público en estos sistemas de movilidad no garantiza el incremento en uso, se debe considerar la eficiencia, seguridad y limpieza de estos servicios.

¹ La congestión vehicular compara el tiempo de traslado de 10 kilómetros entre los momentos de movilidad fluida y en las horas punta (TomTom, 2025)

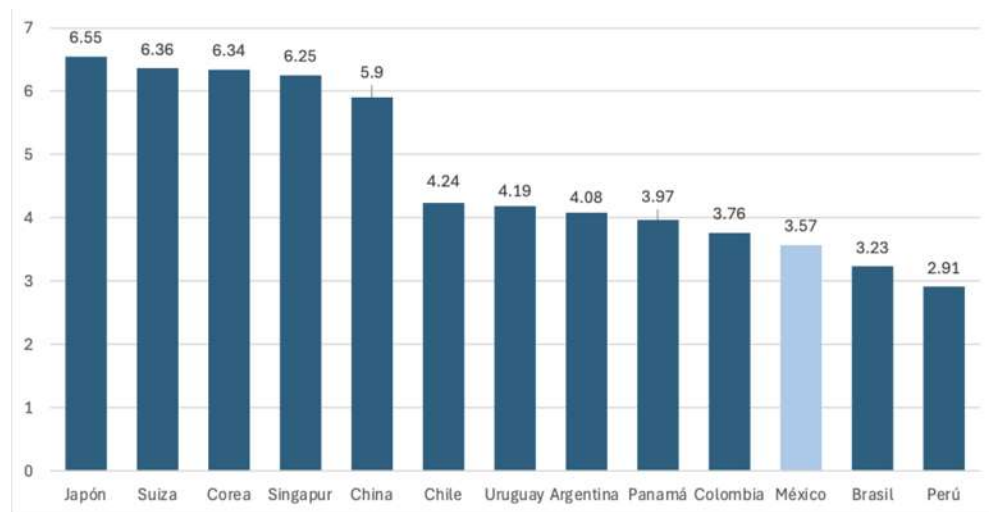
Los sistemas de transporte público y en particular los sistemas de transporte público ferroviario urbano han sido ampliamente reconocidos como medios de movilidad con una eficiencia energética y ambiental superior debido a la cantidad de pasajeros transportados y kilómetros recorridos por unidad de energía consumida frente a otro tipo de medios de transporte como el automóvil privado motorizado. No obstante, también se ha argumentado sobre la importancia de la implementación de estrategias operativas y tecnológicas que hagan prevalecer estas ventajas frente a las constantes y rápidas innovaciones tecnológicas en la industria de los automóviles privados. Por lo cual, resulta imprescindible monitorear su eficiencia de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México considerando la eficiencia de consumo energético e impacto ambiental con respecto al volumen de demanda para alcanzar una movilidad sostenible (Batty y Palacin, 2015; To *et al.*, 2020).

Un estudio elaborado por Webster y Bly (1982) sugiere que los aspectos más importantes que influyen en la elasticidad de la demanda del transporte público son las tarifas y la calidad del servicio con especial énfasis en la confiabilidad que las personas tienen con respecto a los servicios de transporte. Al respecto la *Economic and Social Commission for Western Asia* (UNESCWA, 2016) o en español, la Comisión Económica y Social de las Naciones Unidas para Asia Occidental argumenta que para garantizar un transporte sostenible se deben considerar factores como la accesibilidad, el costo, la producción económica, la seguridad, el impacto ambiental y el desempeño técnico. En cuestión del desempeño técnico se señala que es medido por el número anual de personas que viajan utilizando algún modo de transporte público y las distancias recorridas (UNESCWA, 2016) lo cual está ligado con los objetivos 7, 9 y 11 de la Agenda 2030 de desarrollo sostenible encaminados a la generación de infraestructura sostenible y lograr ciudades resilientes.

En México, la percepción de eficiencia de los sistemas de transporte urbano de pasajeros ha registrado niveles inferiores con respecto a otros países de América Latina, región que a su vez se encuentra altamente rezagada con respecto a otras partes del mundo.

Figura 1.1

Nivel de percepción de eficiencia de los servicios de transporte público urbano: comparación entre países líderes, principales países de América Latina y México en 2024



Nota: la escala de medición es de 1 a 7 donde 7 significa extremadamente eficientes y 1 extremadamente ineficientes.

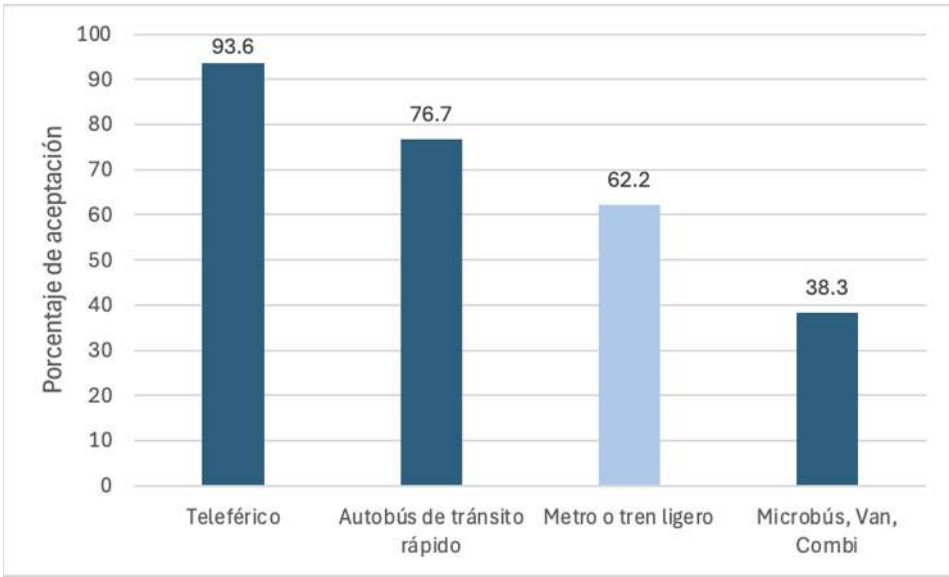
Fuente: elaboración propia con base en el reporte de Índice de Desarrollo de Viajes y Turismo del Foro Económico Mundial (2024)

La gráfica anterior evidencia que existe una disparidad importante en la percepción de eficiencia de los servicios de transporte público urbano, los países líderes como Japón (6.55), Suiza (6.36) y Corea (6.34) tienen niveles altos de percepción de eficiencia lo que retrata una infraestructura y operación desarrollada, los países de América Latina mantienen niveles considerablemente bajos incluso Chile (4.24) que es el país líder de la región tiene una eficiencia percibida considerablemente inferior con respecto a los países mejor evaluados, México (3.57) se encuentra sólo por encima de países como Brasil (3.23) y Perú (2.91) dentro de los países con mayor población en América Latina. La información anterior expone la necesidad del desarrollo de políticas públicas orientadas a evaluar las condiciones de operación e infraestructura de los servicios de transporte público urbano en México factor necesario para incrementar su uso y alcanzar una movilidad sostenible.

Con el objetivo de comprender de manera más profunda la percepción de los servicios de transporte público urbano, es importante revisar los niveles de aceptación con respecto a la experiencia de los usuarios, los cuales se muestran en la siguiente gráfica.

Figura 1.2

Porcentaje de aceptación ciudadana de los principales modos de transporte público y masivo en México en 2023



Nota: la gráfica retrata el porcentaje de personas encuestadas que se encuentran satisfechas de acuerdo con cada modo de transporte.

Fuente: elaboración propia con base en la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental del Instituto Nacional de Estadística y Geografía de 2023 (INEGI, 2024)

Como se puede observar en la figura 2, existe una variabilidad importante de los grados de aceptación de los modos masivos de transporte público urbano en México. Los sistemas como el teleférico donde se incluyen el Mexibús y Cablebús tienen un porcentaje de aprobación del 93.6% a nivel nacional, le siguen los sistemas de Autobús de Tránsito Rápido con el 76.7%. Sólo por encima de las Combis, Van y Microbús (38.3%) se encuentran los sistemas de Metro o Tren Ligero (62.2%) lo que retrata que de los sistemas que requieren la instalación de infraestructura estructurada este modo de transporte es el peor evaluado por la ciudadanía, exponiendo la

necesidad de realizar estudios enfocados a este modo de transporte que expliquen la mala percepción de la ciudadanía.

En el caso específico de los sistemas públicos de tren urbano de las principales zonas metropolitanas de México existe un área de oportunidad en la mejora de la prestación de estos servicios, en la Ciudad de México sólo el 49.9% de los ciudadanos está satisfecho con el servicio de metro, lo que marca una diferencia importante con respecto a otros servicios como el teleférico o Cablebús donde el grado de aceptación en esta entidad alcanza el 95% (INEGI, 2024).

Incluso dentro de los servicios de transporte público ferroviario urbano es posible distinguir una gran disparidad en la percepción ciudadana de los tres sistemas operativos en el país, mientras que el Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara, Jalisco tiene un nivel de aprobación del 92.3% el Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en Nuevo León solo alcanza el 67.9% (INEGI, 2024). Estas diferencias exponen que hay características operativas que inciden en la eficiencia y satisfacción del servicio, en este sentido, se vuelve fundamental realizar evaluaciones de esta modalidad de transporte público que permitan conocer las causas de las diferencias en la percepción de desempeño entre las zonas metropolitanas.

En la literatura especializada existen valiosas aportaciones sobre desempeño técnico de los sistemas de transporte público urbano y masivo en México como la investigación de Delfín y Melo (2017) para la ciudad de Morelia, no obstante, queda un área de oportunidad importante en torno al análisis comparativo interno de México con respecto a las dinámicas recientes de transporte público ferroviario urbano.

Por lo tanto, el rumbo de la presente investigación se encuentra encaminado a estudiar la eficiencia del Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC [Metro]) de la Ciudad de México, el Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) de la ciudad de Guadalajara y el Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey (STC [Metrorrey]) de la ciudad de Monterrey, en 2023 y 2024 a partir de los insumos de capital y de operativos con los que cuentan con base en los criterios establecidos por Vuchic (2007) y Ortúzar y Willumsen (2011) (capacidad de la flota, frecuencia semanal e infraestructura instalada) y a partir de lo establecido por Vuchic (2007), los productos que generan (cantidad de

pasajeros transportados) incluyendo los criterios señalados por (UNESCWA, 2016) en relación con el impacto ambiental (emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero) empleando un Análisis Envoltante de Datos (DEA por sus siglas en inglés).

1.2 Preguntas de investigación

Un problema de investigación debe ser enunciado como una pregunta que expresa la relación de dos o más variables, por ejemplo: ¿qué relación tiene A con respecto a B?, ¿qué relación tiene A con respecto B y C? o ¿qué condiciones existen para la relación de A y B a partir de C? (Kerlinger y Lee, 2002)

Para esta investigación se planteó una pregunta general y tres preguntas específicas con la finalidad de conocer un panorama general del fenómeno que se está estudiando a través de un desglose particular de los objetos de estudio.

1.2.1 Pregunta general

¿Cómo el capital móvil, el capital fijo, la capacidad operativa, el volumen anual de demanda y las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) anuales determinaron la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas transporte público ferroviario urbano en México, 2023 - 2024?

1.2.2 Preguntas específicas

¿De qué forma la capacidad de la flota, el número de estaciones, la frecuencia semanal planificada y la cantidad de pasajeros transportados influyeron en la eficiencia técnica de las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 - 2024?

¿Cómo la capacidad de la flota, el número de estaciones, la frecuencia semanal planificada, la cantidad anual de pasajeros transportados y las emisiones indirectas de GEI impactaron en la eficiencia técnica sostenible de las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema

de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 - 2024?

¿En qué medida la eficiencia técnica sostenible proporciona un desempeño operativo contrastante con respecto a la eficiencia técnica en las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 - 2024?

1.3 Objetivos de la investigación

Para comprender la finalidad de una investigación científica se retoma la siguiente idea “en primer lugar, es necesario establecer qué se pretende con la investigación, es decir, cuáles son sus objetivos [...] debe mencionarse cuál es ese problema y de qué manera se piensa que el estudio ayudará a resolverlo.” (Hernández *et al.*, 2014, p.37). De modo que para esta investigación se plantearon los siguientes objetivos

1.3.1 Objetivo general de la investigación

Explicar cómo el capital móvil, el capital fijo, la capacidad operativa, el volumen anual de demanda y las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) anuales, determinaron la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023- 2024.

1.3.2 Objetivos específicos de la investigación

Evaluar de qué forma la capacidad de la flota, el número de estaciones, la frecuencia semanal planificada y la cantidad de pasajeros transportados influyeron en la eficiencia técnica de las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 – 2024.

Determinar cómo la capacidad de la flota, el número de estaciones, la frecuencia semanal planificada, la cantidad anual de pasajeros transportados y las emisiones indirectas de GEI impactaron en la eficiencia técnica sostenible de las líneas del Sistema de Transporte

Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 - 2024.

Analizar en qué medida la eficiencia técnica sostenible proporcionó un desempeño operativo contrastante con respecto a la eficiencia técnica en las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 - 2024.

1.4 Justificación

En esta parte de la indagatoria el investigador debe establecer la viabilidad de su proyecto, así como un concreto aporte a la disciplina o disciplinas en la que se encuentra ubicado, para ello debe desglosar este aporte en distintas dimensiones (Salinas y Cárdenas, 2009) tal como se hizo para esta investigación.

1.4.1 Trascendencia

Esta investigación ofrece un aporte cuantitativo que trasciende el ámbito académico al contribuir al diseño de políticas públicas basadas en evidencia, enfocadas a la movilidad urbana y el transporte público masivo en países de ingreso medio como México. A partir de la aplicación de una metodología DEA se puede comparar la eficiencia de los sistemas ya existentes en las principales áreas metropolitanas en un contexto actual, sentando un antecedente para el desarrollo de metodologías que permitan establecer criterios de evaluación técnicos. Esto permitirá un uso más eficiente de los recursos y aportará al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la movilidad urbana, promoviendo mejoras sostenibles y replicables en más regiones del país.

1.4.2 Conveniencia

La relativamente reciente implementación de sistemas de monitoreo en las operaciones del transporte urbano masivo en zonas metropolitanas del país ha logrado establecer modelos de transporte más organizados, tecnificados y con un mayor involucramiento de las instituciones

públicas. Estos nuevos modelos incorporan herramientas tecnológicas como el pago electrónico y de seguimiento de las unidades mediante Sistemas de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas inglés) lo que ha incrementado la disponibilidad de datos para realizar estudios de desempeño técnico más precisos. Esta investigación es conveniente en el contexto actual debido a que podría contribuir a la toma de decisiones en el corto y mediano plazo a partir de información más completa y confiable sobre la operación de los sistemas, en especial, en los proyectos de expansión de los sistemas ferroviarios urbanos como las líneas 4 y 6 del STC (Metrorrey).

1.4.3 Relevancia social

En México, se estima que el 82 % de la población se asienta en zonas urbanas (Banco Mundial, 2025c) lo cual implica una alta demanda en los servicios públicos como el transporte, especialmente en zonas periféricas donde generalmente residen las poblaciones con menores ingresos. Estas poblaciones requieren recorrer grandes distancias para llegar a sus centros de trabajo, los cuales, en su mayoría, se encuentran concentrados en las partes más céntricas, se estima que en México para el año 2018 una persona gastaba alrededor de 1,657 pesos trimestrales en el uso del transporte público (Cruz *et al.*, 2023). Por lo tanto, estudiar la eficiencia de los sistemas de transporte público ferroviarios urbanos tiene una importante relevancia social.

1.4.4 Implicaciones prácticas

Esta investigación aporta un panorama actualizado sobre el desempeño técnico de los sistemas de transporte público urbano y masivo ya establecidos en México. Al ampliar la disponibilidad de datos en función de indicadores de eficiencia, otorga a las instituciones operadoras de carácter público una base para lograr una mejor gestión de sus recursos e insumos. A través de comparaciones con otros sistemas de transporte similares, es posible generar una perspectiva más amplia sobre su rendimiento relativo y detectar áreas de mejora. De igual manera, los resultados de esta investigación pueden ser empleados como una guía que permita delimitar las características generales de las rutas o líneas que muestran un desempeño más eficiente, lo que puede traducirse en decisiones operativas, técnicas y presupuestales más adecuadas.

1.4.5 Valor teórico

La presente investigación ofrece una perspectiva teórica-referencial en torno a la caracterización de eficiencia del transporte público ferroviario y urbano y la eficiencia técnica sostenible. Aporta a una nueva referencia respecto al cómo entender el desempeño técnico de este tipo de servicios en contextos complejos. Adicionalmente, abona a la discusión teórica sobre la viabilidad de la aplicación de conceptos de eficiencia originalmente propuestos en un contexto de producción industrial y empresarial en la provisión de servicios públicos, contribuyendo a la forma de pensar estos enfoques en una lógica de bienestar social y colectivo.

1.4.6 Utilidad metodológica

En esta indagatoria se emplea un Análisis Envolvente de Datos (DEA por sus siglas en inglés) el cual funciona desde una visión no paramétrica que permite construir indicadores de eficiencia relativa a partir de las características observadas en las unidades analizadas. Esta metodología es útil debido a que permite estudiar a los sistemas de transporte público urbano y masivo de distintas zonas urbanas del país ya que considera múltiples insumos y productos sin la necesidad de una función de producción específica. De igual manera, se realizó una labor sistémica en la una obtención y organización de datos no disponibles en los repositorios públicos oficiales, a través de requerimientos formales vía instituciones de transparencia y acceso a la información. Este enfoque metodológico permitió la generación de evidencia empírica confiable a partir de una comparativa de distintos contextos urbanos.

1.4.7 Horizonte espacial y temporal

En este documento se analizaron las distintas líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey durante los años 2023 y 2024.

1.4.8 Viabilidad de la investigación

La implementación de herramientas tecnológicas en los sistemas de transporte público y urbano, así como la existencia de mecanismos legales respaldados por instituciones garantes del acceso a la información permiten recopilar los datos relacionados con la operatividad y gestión de estos servicios, lo que permitió llevar a cabo la metodología DEA. Con el propósito de garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los datos se decidió acotar el análisis a los dos años anteriores a la realización de esta investigación, permitiendo la viabilidad técnica y emperica del estudio.

1.5 Tipos de investigación

Con base en lo explicado por Navarro y Torres (2007) es imperativo que el investigador verifique la congruencia entre el problema planteado y los objetivos con respecto al nivel de respuesta que se pretende alcanzar al momento de concluir la investigación, en relación con este aspecto, se plantea que el presente proyecto pase por todos los niveles hasta llegar al explicativo lo que se justifica a continuación:

1.5.1 Descriptivos

Esta investigación atraviesa, en primer lugar, por una dimensión descriptiva al recopilar y ordenar datos relacionados con los sistemas de transporte público ferroviario urbano en las principales zonas metropolitanas en México. Se caracterizan factores como la cobertura, la cantidad de pasajeros transportados y los insumos con los que operan, como trenes, frecuencia del servicio y uso real.

1.5.2 Exploratorios

El ejercicio de investigación que se está realizando es de carácter exploratorio ya que se elaboró una comparativa sistemática entre los sistemas de transporte público ferroviario urbano de las principales zonas metropolitanas de México con la finalidad de determinar su eficiencia técnica y

su eficiencia técnica sostenible. A pesar de que existen estudios previos que utilizan el transporte público urbano como objeto de estudio en el país, hay una escasez en literatura académica que emplee el Análisis Envolvente de Datos, además, no se tiene registro de estudios que empleen esta metodología en el estudio en diferentes contextos con respecto a los sistemas ferroviarios de transporte urbano de pasajeros en México. De tal modo que esta indagación abre nuevas líneas de análisis y genera insumos para próximas investigaciones que decidan profundizar en el tema.

1.5.3 Correlacionales

El presente estudio plantea una relación dentro los insumos con los que operan los distintos servicios de tren urbano de pasajeros, los productos que generan y los productos no deseados con la finalidad de establecer un nivel de eficiencia técnica y eficiencia técnica sostenible. Por lo tanto, se puede determinar que alcanza una dimensión correlacional.

1.5.4 Explicativos

A través del análisis de holguras (*slacks*) se pudo determinar los insumos que e_j están siendo subutilizados en algunas líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, lo que hizo posible ofrecer una explicación de niveles bajos de eficiencia en determinadas líneas o rutas estudiadas. Este enfoque complementario a la metodología DEA permitió alcanzar el nivel explicativo que es el máximo alcance de la investigación científica.

1.6 Resumen crítico

1.6.1 Teorías que sustentan académicamente la investigación

En este apartado se expone el bagaje académico que da sentido a esta investigación, retomando conceptualizaciones en torno a la eficiencia, servicios y transporte públicos.

Con la finalidad de abordar la eficiencia es indispensable remitirse a la obra de Farrell (1957) *The measurement of productive efficiency*. Este artículo es una de las bases para entender el concepto

de eficiencia técnica. Fue de los primeros aportes en considerar la medición de la eficiencia relativa a través de la generación de fronteras de eficiencia de producción construidas dentro del propio sistema con base en sus insumos (*inputs*) y sus productos (*outputs*).

Continuando por la línea de eficiencia resulta relevante recuperar la obra de Charnes, Cooper y Rhodes (1978) *Measuring the efficiency of decision making units* este artículo toma como referencia los aportes de Farrell (1957) con la finalidad de medir la eficiencia relativa de Unidades de Decisión (DMUs por sus siglas en inglés), su aporte metodológico se sustenta en la medición en hospitales, escuelas y sistemas de transporte, lo que hizo posible la creación del modelo de Análisis Envoltente de Datos (DEA) con rendimientos constantes.

Otra de las obras importantes para la construcción del marco teórico – metodológico fue el texto de Banker, Charnes y Cooper (1984) titulado *Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis* el cual permite incorporar rendimientos variables a escala (VRS) en la medición de la eficiencia a través del DEA haciendo posible diferenciar la eficiencia técnica pura y la eficiencia de escala.

.

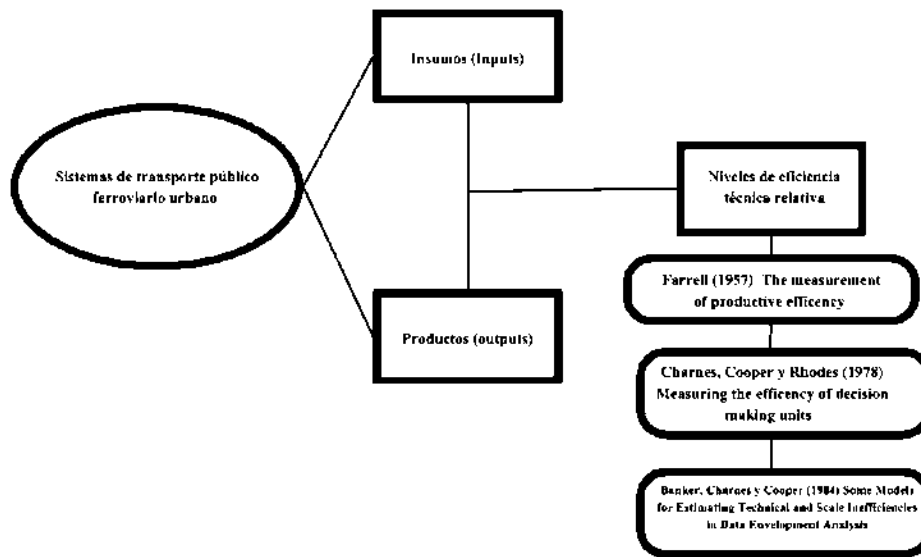
Finalmente, la parte central de esta investigación está orientada a los sistemas de transporte público, por lo cual resulta imprescindible el empleo de referencias teóricas en torno al transporte público, para ello se aborda el documento de Vuchic (2007) el cual caracteriza al transporte y aporta criterios clave que permiten la evaluación de su desempeño.

1.6.2 Diagrama sagital

En la siguiente figura se representa de manera gráfica las interacciones entre el objeto de estudio y las concepciones teóricas que sustentan los factores que se le relacionan.

Figura 1.3

Diagrama sagital de la investigación



Fuente: elaboración propia con base en la literatura revisada

1.7 Método y metodología de la investigación

1.7.1 Método

Para comprender lo que es el método se retoma la siguiente definición: “camino a seguir mediante una serie de operaciones, reglas y procedimientos fijados de antemano de manera voluntaria y reflexiva, para alcanzar un determinado fin que pueda ser material o conceptual” (Ander-Egg, 1995, p.41). El método que se aplicará en la presente investigación es el método científico que Pulido define como “el medio para dilucidar las cuestiones investigadas a través de la observación, clasificación, demostración e interpretación de los fenómenos objeto de estudio” (2015, p.1141).

De acuerdo con las características de esta investigación se decidió emplear el método analítico-sintético, el cual parte de descomponer el todo en cada una de sus partes para estudiarlas de forma individual para después volver a integrarlas en un todo. En este sentido, la investigación parte de descomponer los sistemas de transporte público ferroviario urbano en los insumos, producto y

producto no deseado que generan, para en un segundo momento sintetizarlos en el nivel de eficiencia conseguido.

1.7.2 Metodología de la investigación

Para Navarro (2014) la metodología es el estudio del método. Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo de corte transversal, aplicando un modelo de eficiencia relativa de Análisis Envolvente de Datos (DEA) a partir de los datos de operación de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en las principales zonas urbanas de México durante los años 2023 y 2024.

1.8 Hipótesis de la investigación

Una hipótesis puede entenderse como la respuesta provisional la cual no se pretende responder de manera estricta, es una predicción que forma parte del método científico la cual está conformada por una base a partir del marco teórico (Espinoza, 2018). Para esta investigación estas respuestas están acorde con las preguntas y objetivos planteados en torno a los sistemas de transporte público ferroviario urbano de México durante los años 2023-2024.

1.8.1 Hipótesis general

El capital móvil, el capital fijo, la capacidad operativa, el volumen anual de demanda y las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero anuales fueron los principales factores que determinaron la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023 y 2024.

1.8.2 Hipótesis específicas

La capacidad de la flota, el número de estaciones, la frecuencia semanal planificada y la cantidad de pasajeros transportados fueron los principales insumos y producto que influyeron en la eficiencia técnica de las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 y 2024.

La capacidad de la flota, el número de estaciones, la frecuencia semanal planificada, la cantidad de pasajeros transportados y las emisiones indirectas de GEI anuales fueron los principales insumos, producto y producto no deseado que impactaron en la eficiencia técnica sostenible de las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 y 2024.

La eficiencia técnica sostenible proporcionó un desempeño operativo superior con respecto a la eficiencia técnica en las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 - 2024

1.9 Operacionalización

Uno de los puntos más importantes de la investigación es la identificación de las variables las cuales se pueden definir como todo aquello que se puede medir, la información que puede ser colectada o los datos recabados que contribuyen a dar respuesta a las preguntas de investigación para ello es indispensable categorizar las de tipo independiente y dependiente (Villasís-Keever y Miranda-Novales, 2016).

1.9.1 Variables

Variables dependientes

Y_1 = Eficiencia de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de México.

Variables independientes

Insumos (inputs)

X_1 = Capital móvil

-Capacidad de la flota = Cantidad de pasajeros que la flota es capaz de transportar

X_2 = Capital fijo

-Número de estaciones instaladas

X_3 = Capacidad operativa

-Frecuencia semanal planificada (días laborales)

Productos (*outputs*)

X_4 = Volumen anual de demanda

-Cantidad anual de usuarios transportados

Productos no deseados (*undesirable output*)

X_5 = Emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) anuales

-Consumo eléctrico anual por el factor de emisión en CO₂eq

1.9.2 Instrumentos

Los instrumentos en la investigación dan la posibilidad a los investigadores de medir, observar, pesar y consignar las variables con la finalidad de recopilar información que sea de utilidad para continuar con los pasos establecidos para alcanzar los objetivos (De la Lama *et al.*, 2022).

Instrumentos cuantitativos

Los instrumentos cuantitativos se pueden agrupar en tres: protocolos, pruebas proyectivas y cuestionarios. Los protocolos tienen la función de mostrar un hecho observado de manera sistemática (De la Lama *et al.*, 2022).

Los instrumentos empleados para esta investigación son de carácter protocolario pues son datos que surgen de la observación sistemática de la operación cotidiana de los sistemas de transporte público ferroviario urbano los cuales fueron recuperados por informes de las instituciones

operativas requeridos a través de la Plataforma Nacional de Transparencia y Acceso a la Información y procesados a través del programa Rstudio (2025).

1.10 Universo y objeto de estudio

1.10.1 Universo

Sistemas de transporte público ferroviario urbano de México

1.10.2 Objetos de estudio

Las 12 líneas del Sistema de Transporte Colectivo (Metro) de la Ciudad de México, las 3 líneas del Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara y las líneas 1 y 2-3 del Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) de Monterrey, Nuevo León.

1.11 Alcances y limitaciones de la investigación

Como se mencionó con anterioridad esta investigación puede aportar conocimiento valioso en relación con el empleo del Análisis Envolvente de Datos (DEA) en el contexto del transporte público urbano y masivo en México con un enfoque comparativo lo que puede hacer posible la toma de decisiones operativas dentro de los sistemas, pero además puede contribuir al diseño de políticas de movilidad urbana.

Una de las principales limitantes de la investigación es que se están considerando únicamente la eficiencia técnica dejando a fuera del modelo las percepciones de los usuarios con respecto a su funcionamiento que también es de gran importancia al momento de evaluar los sistemas de transporte público urbano y masivo. De igual manera no se están considerando otros factores exógenos como la calidad institucional, la gobernanza o corrupción, elementos fundamentales al momento de hacer propuestas de política pública. Finalmente, este estudio solo se enfoca en los años 2023 y 2024 lo que impide analizar tendencias o incidencias coyunturales en periodos anteriores.

Capítulo 2

El transporte público y el estado actual de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de México

2.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo realizar una revisión de las definiciones, características, elementos principales del transporte público, así como presentar un panorama del estado del transporte público en México y en particular de los sistemas de transporte público ferroviario urbano a los que esta investigación estuvo enfocada. Se revisaron textos referentes en las descripciones teóricas y técnicas sobre estos sistemas, de manera subsecuente, hizo una revisión sobre la relación del transporte público con la economía y los Objetivos de Desarrollo sostenible de la Agenda 2030, así como una retrospectiva de la evolución de los sistemas de transporte público a nivel global. En el segundo apartado se describió el estado general del transporte público en México a partir de dimensiones como la accesibilidad, competitividad y percepción ciudadana y el marco jurídico y de políticas relacionados con esta investigación. Finalmente, el último apartado estuvo enfocado en exponer las condiciones productivas que moldearon los sistemas de transporte público ferroviario urbano durante el periodo 2010-2024.

2.2 Panorama general del transporte público

En la literatura es posible encontrar diversas perspectivas sobre la definición y elementos que integran al transporte público. Al respecto la *American Public Transit Association* (APTA) o en español la Asociación Estadounidense de Transporte Público define al transporte público como el transporte a través de autobuses, trenes o de otro modo que pueden ser de pertenencia pública o

privada que proveen un servicio regular y continuo al público general al que también se le puede llamar transporte público masivo (APTA, 1994).

En esta misma línea, el *Expert Group for Urban Mobility* (EGUM) o en español Grupo de Expertos en Movilidad Urbana de la Comisión Europea agregan que el transporte público tiene como una de sus principales características que el usuario no es el dueño del medio de transporte lo que implica su disponibilidad sin la necesidad de adquisición previa de los vehículos (como automóviles, motocicletas o bicicletas), distinguen que si bien, algunos autores integran los medios de transporte de largas distancias, su entendimiento del transporte público se enmarca en solo los medios de transporte disponibles en la movilidad diaria y funcionales en las zonas urbanas y periurbanas (EGUM, 2022). Otra definición es aportada por Vuchic (2007) quien argumenta que el transporte público es aquel modo de transporte que tiene rutas y horarios establecidos y que está disponible para todas aquellas personas que se encuentren dispuestas a pagar la tarifa establecida.

Con la finalidad de distinguir las particularidades del transporte público sobre el privado es importante retomar las ideas de Gao y Zhu (2022) quienes mencionan que en las zonas urbanas el transporte puede dividirse en tres categorías: transporte público, transporte privado y transporte de carga. El primero se refiere a los transportes que se utilizan bajo la propia demanda, que se encuentran disponibles en cualquier momento y que permiten viajar de manera privada donde el usuario es dueño del vehículo. El tercero hace referencia a los sistemas que son utilizados para la movilización de mercancías y no de personas.

Los automóviles han sido desde el comienzo de su producción en masa la forma más común de transporte urbano privado. En la realidad actual, los modos de transporte como los automóviles privados han sido tratados como un sinónimo de estatus y riqueza. De igual manera desde una perspectiva social y económica general, los automóviles privados han sido empleados como indicadores de desarrollo económico y urbano, lo que ha derivado en políticas de movilidad urbana centradas en este tipo de transporte (Gao y Zhu, 2022).

Ortúzar y Willumsen (2011) señalan que uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la movilidad urbana es la pobreza o carencia de políticas de transporte, al respecto, señalan que se

debe hacer un esfuerzo para mejorar su operación y planificación. Bajo este argumento los autores proponen un marco de análisis de los elementos que componen a los sistemas urbanos de transporte siguiendo la lógica microeconómica de oferta y demanda.

La demanda en el transporte público es un elemento derivado del propio sistema mas no el fin mismo, salvo en los casos donde las personas hacen uso con la finalidad de satisfacer una necesidad como el trabajo, el ocio, la salud o la educación llevando a cabo una actividad en una ubicación determinada. Ortúzar y Willumsen (2011) señalan que el entendimiento de la demanda en este sector tiene características ampliamente cualitativas y diferenciadas, siendo indispensable que se contemplen elementos como el tipo de viaje o la importancia que se le da a la velocidad y frecuencia, por lo tanto, una manera de condensar estas especificaciones puede ser a través de los indicadores de pasajeros-kilómetro ya que unifican un importante rango de requerimientos y servicios.

El tiempo y el espacio son dos factores dinámicos fundamentales al momento de caracterizar la demanda de los servicios de transporte urbano y con ello su planeación y modelación. Por un lado, la dimensión espacial contempla concentraciones de la población en ciertas zonas en específico, lugares en donde se concentran las principales actividades económicas y servicios de una ciudad, mientras que, en cuestión del tiempo, los diferentes momentos del día tienen un impacto distinto en torno a la densidad de la demanda así lo demuestran las diferencias entre la afluencia durante las horas punta y valle.

Ortúzar y Willumsen (2011) argumentan que el transporte urbano es un servicio mas no un bien, por lo tanto, debe ser consumido en el momento en el que se produce de otro modo existe una pérdida en sus beneficios. Los elementos de este servicio tienen una relación directa con su naturaleza, estos requieren de activos fijos como la infraestructura, así como de unidades móviles (vehículos), es la combinación de ambos elementos más las reglas o lineamientos de operación lo que hacen posible el movimiento de las personas. En muchos de los casos los agentes que prestan los servicios no suelen ser los mismos que quienes los poseen, con la excepción de la mayoría de los casos de los sistemas ferroviarios urbanos. Este contexto genera una relación compleja entre

los sistemas de gobierno (dueños de la infraestructura y en algunos casos de las unidades móviles), las empresas proveedoras del servicio y los usuarios.

En resumen, para Ortúzar y Willumsen (2011) los sistemas de transporte se componen de los siguientes elementos: infraestructura (extensión de los caminos y vías), el manejo del sistema (reglas y estrategias de control) y los modos de transporte y sus operadores. Es a partir de estos elementos que se puede construir una ecuación de la capacidad de los sistemas de transporte:

Ecuación 2.1

$$Q = f(I, M)$$

Donde **Q** es la capacidad de los sistemas de transporte urbano que se encuentran en función de **I** la inversión histórica de largo (infraestructura) y corto plazo (unidades de transporte) y **M** que representa a las características del manejo del sistema.

Siguiendo en la línea de los elementos que conforman el transporte se puede rescatar la clasificación elaborada por Vuchic (2007), este señala que existen elementos físicos que conforman a los sistemas como son:

- Vehículos: la flota de vehículos o capital rodante (en el caso de los sistemas ferroviarios), distingue una unidad de transporte como aquellas que viajan juntas, ya sea de un solo vehículo como en el caso de los autobuses o un tren como el caso de los sistemas ferroviarios
- Caminos o derechos de vía, como lo son las calles compartidas, los carriles exclusivos o las propias vías en el caso de los sistemas ferroviarios.
- Instalaciones: como lo son las estaciones o paradas. Son los lugares donde las unidades de transporte paran y suben y bajan pasajeros, en el caso de las estaciones estas pueden ubicarse por encima o debajo de los sistemas, se clasifican de paso, terminales y de transferencia o correspondencia, las primeras solo suben y bajan pasajeros mientras que las

segundas se ubican en la parte final del recorrido, por último, las terceras son aquellas que se comporten por una o más líneas.

- Los garajes para resguardar las unidades de transporte, los patios de maniobra y talleres en el caso de los sistemas ferroviarios.
- Los sistemas de control
- Sistemas de transporte inteligentes que son aquellos que tienen incorporado sistemas electrónicos y automáticos que permiten tener un mayor control sobre las operaciones, el ingreso de pasajeros y los ingresos por tarifa.

Para Vuchic (2007) las características de operación de un sistema de transporte público incluyen actividades como la planificación de los horarios, el desplazamiento y supervisión de las unidades de transporte, la recolección de la tarifa y el mantenimiento del sistema. El servicio del transporte se conforma a partir de los siguientes elementos: 1) desempeño del sistema, donde se incluye la frecuencia, la velocidad, la confiabilidad, la seguridad, la capacidad, la capacidad productiva, la productividad, el uso; 2) el nivel de servicio que se compone por las características de desempeño que afectan a los usuarios, la calidad del servicio y el precio; 3) los impactos (positivos o negativos) que el sistema genera en su contexto y 4) los costos, como son la inversión a largo plazo y los costos operativos.

Vuchic (2007) comparte diversas clasificaciones que se pueden hacer para agrupar los distintos modos de transporte público, esta se puede ver a continuación.

Tabla 2.1

Clasificaciones de los sistemas de transporte público urbano

Por derechos de vía	Por tecnología	Por tipos de servicio
• Categoría A: Total control de la vía sin intervención legal de otros sistemas o personas • Categoría B: Vías separadas de otro tipo de transporte por barreras pero	• Soporte: es el contacto vertical entre el vehículo y la superficie, en el caso del transporte ferroviario entre la rueda y la vía metálica	• De tránsito corto: se emplea únicamente en áreas reducidas con alta densidad como aeropuertos o campus universitarios • De ciudad: Operan en grandes o

que permite el cruce de vehículos y peatones y comparte la infraestructura con todos los demás modos de transporte	• Guía: se refiere a la capacidad lateral de maniobra de los sistemas, en el caso ferroviario este está restringido por los cambios de dirección en las vías • Propulsión: se refiere a los métodos de aceleración, pueden ser motores de combustión interna o eléctricos o por pura inducción lineal eléctrica • Control: manual, semiautomático y automático	medianas distancias dentro de una ciudad • Regional: líneas de alta velocidad con pocas paradas que conectan una región metropolitana.
--	--	---

Fuente: elaboración propia con base en Vuchic (2007)

Los sistemas urbanos ferroviarios tienen cuatro características particulares que los distinguen de otros modos de transporte urbano: la guía externa, la tecnología de vía, la propulsión eléctrica y la separación de la vía. En cuestión de la tecnología son guiados de manera externa, de modo que el operador controla únicamente la velocidad. Estas características restringen su uso a solo la extensión de las vías limitaciones que se ven agudizadas debido a que requieren de una fuerte inversión en infraestructura (Vuchic, 2007)

Otra de las principales características de los sistemas ferroviarios urbanos es que son el medio de transporte óptimo donde hay una intensa demanda, sin embargo, esta no es la única característica que impacta en su viabilidad ya que pueden no preferirse en áreas urbanas donde hay una importante prioridad hacia el peatón o se busca maximizar el uso de suelo. Sin embargo, estos sistemas suelen tener un impacto significativo en el uso del transporte público ya que atraen una mayor cantidad de pasajeros y generan más viajes que los sistemas (como de autobús) que han sustituido en las ciudades donde se han implementado.

Los sistemas urbanos ferroviarios pueden subagruparse de acuerdo con las características tecnológicas que tienen, las 4 agrupaciones principales son: 1) tranvías, 2) trenes ligeros, 3) trenes de tránsito rápido y 4) trenes regionales o interurbanos. Las principales características que permiten diferenciar estos tipos de trenes que ver con la capacidad de los trenes, su altura, modo de propulsión, rapidez y frecuencia como se puede observar en la tabla siguiente:

Tabla 2.2

Características de los tipos de transporte ferroviario urbano

Tipo de transporte ferroviario	Capacidad total	Modo de propulsión	Altura del piso de la estación para su ascenso	Frecuencia en hora pico (Unidades de transporte por hora)	Velocidad de operación (kilómetros recorridos netos por hora)
Tranvía	100-250	Superior	Baja	60-120	12-20
Tren ligero	110- 350	Superior	Baja o alta	40-90	18-50
Tren de tránsito rápido pesado (Metro)	140-280	Superior o por tercera vía alimentadora	Alta	20-40	25-60
Tren regional o interurbano	140-210	Superior, tercera vía alimentadora o por combustión interna	Alta o baja	10-30	40 -75

Fuente: elaboración propia con base en Vuchic (2007)

Esta investigación estudia los sistemas catalogados como ferroviarios de tránsito rápido pesado y los sistemas de tren ligero, el metro de la Ciudad de México sería catalogado como un sistema pesado de tránsito rápido debido a las dimensiones de los trenes, su capacidad, la altura con respecto al suelo y la frecuencia y velocidad. Los sistemas de Monterrey y Guadalajara se encuentran en un punto complejo de distinción entre los sistemas de tren ligero y de tránsito rápido ya que comparten características de vía, de frecuencia y velocidad similares a los sistemas pesados pero la propulsión y capacidades por tren tienen características a los trenes ligero, incluso Vuchic

(2007) señala que la diferenciación entre estas dos familias suele ser compleja y depende de un conjunto de especificaciones operativas y tecnológicas puntuales.

En cuestión a las mediciones de eficiencia en los sistemas de transporte públicos Vuchic (2007) propone los siguientes elementos a considerarse como los principales indicadores a utilizarse para evaluar su productividad dada la relación de inputs y outputs

- Vehículos - kilómetros recorridos / vehículos / año
 - Mide la eficiencia anual del uso de la flota
- Pasajeros / vehículos-kilómetros recorridos
 - Mide la eficiencia de la intensidad del servicio
- Pasajeros / vehículos / año
 - Mide la eficiencia anual del uso de los vehículos o trenes con respecto a la cantidad de pasajeros
- Pasajeros - kilómetros recorridos / vehículos / año
 - Mide que tanto trabajo hace cada vehículo
- Vehículo - espacio o pasajeros - kilómetros recorridos / empleados / año
 - Mide la eficiencia del trabajo humano
- Pasajeros diarios / número de empleados
 - Mide la eficiencia del trabajo humano por día o por semana
- Vehículos-kilómetros / kilovatios hora
 - Representa la eficiencia técnica energética
- Pasajeros - kilómetros / kilovatios – hora

De esta lista, resulta relevante destacar que los principales productos que se emplean en las mediciones de eficiencia son la cantidad de pasajeros y los kilómetros recorridos por año. En cuestión de los insumos Vuchic (2007) propone de forma más extensa los siguientes elementos como recursos (inputs) comunes a considerar cuando se busca medir el desempeño de los sistemas de transporte:

- Costos

- inversión
- operación
- Capital humano
 - Operadores
 - Administrativos
 - Personal de mantenimiento
- Tiempo
- Espacio
 - Longitud de los vehículos
 - Área de los vehículos
 - Área de los derechos de vía
 - Área ocupada por los vehículos
- Infraestructura
 - Capacidad de la flota
 - Tamaño de la flota
 - Número de líneas
 - Tamaño de la red
- Energía
 - Energía de propulsión
 - Energía para alimentar todo el sistema

Por último, resulta importante resaltar que uno de los principales componentes de los indicadores de uso es la cantidad de viajes programados en relación con el personal o número de trenes, esto permite distinguir fenómenos de uso intensivo o subutilización operativos y la eficiencia de empleo de los recursos como los trenes o el personal Vuchic (2007).

Hasta este momento, se han revisado definiciones de los sistemas de transporte público urbano, que ponen en evidencia su complejidad, se identifican que las principales características que lo definen son: programación de rutas, frecuencia y horarios, disponibilidad de uso a todas aquellas personas que estén dispuestas a pagar la tarifa y la provisión de un servicio continuo. Así mismo, se recuperaron los aportes de Ortúzar y Willumsen (2011) y Vuchic (2007) que permitieron generar

un amplio panorama sobre los principales elementos que conforman a los sistemas de transporte público urbano, del mismo modo, fue posible describir las características principales de los sistemas ferroviarios urbanos.

Como se mencionó con anterioridad, uno de los principales indicadores generales sobre el desempeño de los sistemas de transporte público urbano está relacionado con los impactos que generan en su contexto geográfico y social, estos impactos van más allá de la calidad de la operación es por ello por lo que a continuación se presenta una revisión de la relación que tienen el transporte público con la economía.

2.2.1 La relación del transporte público con la economía

El transporte público resulta un elemento fundamental al momento de hablar de crecimiento económico, en relación con esta idea, una encuesta elaborada por la *International Transport Workers' Federation* (ITF) o bien, en español, Federación Internacional de Trabajadores de Transporte con un alcance en 15 países -de diversos niveles de ingreso y posición geográfica- y con una participación de 16,464 personas arrojó que al menos el 81% de la muestra encuestada considera que el transporte es importante en la economía de su país mientras que el 88% piensa que el transporte es un servicio público importante, es por ello que se puede comprender por qué el 83 % de los encuestados desean que sus gobiernos incrementen el acceso en el transporte, además de que el 80 % quiere que el gobierno invierta en transporte sostenible, mientras que el 79 % desea que el gobierno agregue en sus planes nacionales acciones para lograr disminuir las emisiones en el sector de transporte (ITF, 2022).

Los datos de la encuesta anteriormente mencionada no son fortuitos, al respecto el Banco Mundial (2025a) hace hincapié en la estrecha relación que existe entre el transporte público y el crecimiento económico, este organismo señala que resulta una pieza fundamental en la creación de empleos y la conectividad de las personas con los servicios más básicos como lo pueden ser la salud y la educación. De igual manera, si la inversión en transporte público lleva a que se mejoren sus condiciones y se prefiera en lugar del transporte privado se puede reducir de manera significativa la congestión vial, la contaminación del aire y la emisión de gases de efecto invernadero, en

general, la inversión en el transporte público incrementa el bienestar de las personas (Anciaes y Alhassan, 2024).

Como se ha señalado con anterioridad, uno de los factores clave en los que principalmente impacta el transporte público es la generación de empleos (Anciaes y Alhassan, 2024) al respecto se ha comprobado que existe una relación inversa y estadísticamente significativa entre el tiempo de desplazamiento a los centros de trabajo y el empleo (Johnson *et al.*, 2017), en estos términos se podría decir que el incremento en la calidad de los servicios de transporte incrementa las tasas de empleo. De igual manera un estudio realizado por Sobieralski (2021) en los Estados Unidos de América dio como resultado un impacto significativo en la inversión en infraestructura de transporte en la generación de empleos, señalando que tanto la inversión en carreteras como en la infraestructura ferroviaria puede contribuir en la mejora de este indicador macroeconómico, de igual manera concluye que los resultados pueden contribuir a los hacedores de políticas en la toma de decisiones sobre todo en situaciones donde se presenta una baja tributación o hay un presupuesto limitado para financiar múltiples proyectos, de modo que ante estas situaciones podría convenir emplear políticas que se enfoquen en el crecimiento y en la mejora del transporte público.

Uno de los importantes desafíos que las economías consideradas en desarrollo o de bajos ingresos enfrentan es el sector informal ya que este afecta de manera negativa y significativa el crecimiento económico debido a que es frecuente que las personas que laboran en la informalidad lo hagan en condiciones precarias y con limitado acceso a la seguridad social lo que a su vez tiene impacto en la productividad (Palafox, 2024). En este sentido, un documento publicado por Marín (2022) evidencia el importante grado de sensibilidad entre los costos de desplazamiento de transporte y los trabajadores informales quienes en el caso de las periferias urbanas prefieren permanecer en la informalidad si hay altos costos de desplazamiento, de igual manera, el autor sugiera que una política pública enfocada en transporte puede favorecer a que las zonas más rezagadas incrementen su índice de formalidad laboral.

El sector laboral no es un ente aislado, el Banco Mundial (2025a) retoma la tesis reiteradamente mencionada que argumenta que el crecimiento económico puede llevar a la creación de empleos, a partir de esta premisa vale la pena estudiar el impacto del transporte público en los niveles de

actividad económica. Al respecto la institución de asesoramiento financiero KPMG (2017) sugiere que las redes de transporte eficientes benefician no solo a sus usuarios, sino que generan un crecimiento económico general.

El desarrollo en transporte tiene un impacto significativo en los niveles de actividad económica el cual puede no ser directo, pero es generado a través de las externalidades involucradas con su desarrollo, esta es una conclusión a la que llegaron Huang y Xu (2021) en el estudio del impacto del tren de alta velocidad en China, de igual manera agregan que la integración regional que logra el fomento en este tipo de transporte conlleva a un desarrollo económico de las ciudades. En las condiciones correctas el transporte puede tener un impacto significativo en el incremento al Producto Interno Bruto (PIB), evidencia de ello es el reporte presentado por el *Economic Development Research Group* o bien en español el Grupo de Investigación del Desarrollo Económico arrojó que una inversión de mil millones de dólares (en inglés *one billion*) puede generar hasta 2 mil novecientos millones en ventas, mil ochocientos millones de dólares agregados al Producto Interno Bruto y hasta 382 millones de ingreso fiscal (Economic Development Research Group, 2020).

Es importante distinguir que el avance en los sistemas de transporte requiere necesariamente del desarrollo en infraestructura debido a que, para abrir nuevas líneas de tren, se requiere la construcción de vías férreas, estaciones y patios de maniobra, en relación con esto, estudios como el de Kadyraliev *et al.* (2022) estudian el impacto económico del transporte a partir del desarrollo de la infraestructura, el estudio concluye que en bajo condiciones óptimas la ayuda extranjera en el financiamiento a la infraestructura como lo puede ser la de transporte puede favorecer al crecimiento de la actividad económica en los países menos desarrollados.

Con respecto a la inversión en la infraestructura pública Eddington (2006) resume que un conjunto de estudios empíricos ha demostrado la relación con el incremento el PIB, en un inicio se demostró que un incremento del 10% en los activos físicos del gobierno puede generar un aumento del PIB en 2%, sin embargo, este autor menciona que existe una relación bidireccional entre el desarrollo de la infraestructura pública (de la cual el transporte puede formar parte). Sin embargo, este autor

también concluye que el impacto en el nivel económico del transporte puede tener una relación bidireccional, es decir, que el transporte se ve afectado por el crecimiento económico.

En relación con lo anterior, el artículo publicado por German-Soto *et al.* (2023) se encargó de estudiar la relación causal entre el desarrollo económico y el desarrollo del transporte público en México, si bien los autores hacen mención del paradigma que señala que la inversión en transporte lleva a incrementar los niveles de producción, en realidad, en el caso mexicano era lo contrario, se requería de mayores niveles de actividad económica para incrementar el gasto en infraestructura de transporte, lo cual coincide con lo señalado por Eddington (2006) que por un lado señala la complejidad de establecer el efecto causal de alguna variable sobre el crecimiento y por otro lado indica que la inversión en infraestructura pública está condicionada a los factores pre existentes.

Finalmente, para el año 2024 se ha reportado una ganancia de 288 mil millones de dólares en ganancia en el sector mundial del transporte público, con un promedio de ganancia por usuario de 64.61 dólares (Statista, 2024) de modo que el transporte público genera una ganancia global en sí mismo más allá de las externalidades positivas en otras industrias y en la economía en general.

En resumen, existe evidencia científica que sostiene la relevancia del transporte público en el desarrollo económico, en primera instancia contribuye no solo a la generación de empleos sino también a alcanzar un mayor grado de formalidad sobre todo en regiones precarizadas (Marín, 2022), de igual manera se hace notar que si bien existe un importante paradigma que indica que la inversión en infraestructura del transporte público fomenta el crecimiento económico también existe evidencia que identifica la relación contraria, es decir que el crecimiento económico es necesario para el desarrollo del transporte público, ambos casos se han evidenciado en países considerados en desarrollo.

2.2.2 Evolución del transporte público

El transporte, incluyendo el transporte público, es cambiante algo que se ha demostrado reiteradamente en la actualidad. La historia del transporte público se encuentra ligada a las tendencias demográficas y de desarrollo, así como a las condiciones económicas y de gobierno donde los avances en tecnología en transporte juegan un rol fundamental (Polzin, 2018). Es por

ello por lo que resulta interesante indagar en la evolución histórica de los sistemas de transporte con la finalidad de comprender la relación con las tendencias antes descritas y su desarrollo.

De acuerdo con la Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL) antes de la motorización del transporte público este era principalmente impulsado por la tracción de animales, de modo que en 1662 se da el registro más antiguo de res de transporte urbano corresponde al servicio prestado por Blaise Pascal y su jefe Duque de Roanes. Este servicio se ejecutaba desde un ómnibus tirado por caballos, era de ruta fija, donde por un costo establecido se hacían servicios de traslado a los ciudadanos (a excepción de militares y campesinos) que lo solicitaban (CEPAL, 1994).

Para 1819 Jacques Lafitte volvió a operar en París los servicios de transporte colectivo por tarifa fija, al convertirse en un negocio muy rentable expandió a Inglaterra y una variedad de ciudades en Europa. El ómnibus de tracción animal se convirtió entonces en un medio predominante de transporte urbano, donde en las ciudades más grandes alimentaba las redes de transporte interurbano o de larga distancia como lo eran los trenes y tranvías (CEPAL, 1994).

El tranvía surge como uno de los transportes urbanos más importantes de la época, siendo en un inicio impulsado por tracción animal sobre vías. Este sistema surgió en Nueva York en 1832 y se popularizó hasta 1850 (CEPAL, 1994) este modo de transporte ofrecía una ventaja sobre las diligencias colectivas pues al moverse sobre vías metálicas existía una menor fricción lo que le permitía recortar el tiempo de los trayectos. En Europa para 1895 existían 50 ciudades alemanas e inglesas que eran operadas por servicios de tranvía, 36 en Francia y 16 en España, en aquella época las ciudades modelo en términos de transporte público eran Frankfurt en Alemania y Glasgow en Reino Unido (Oyón, 1999).

Si bien las diligencias lograron coexistir con los tranvías incluso después de su electrificación estos tuvieron su punto máximo de uso hasta 1910 cuando el transporte mecanizado logró desplazarlo de forma definitiva debido a su ineficiencia. El tranvía a vapor tuvo un pequeño auge durante la segunda mitad del siglo XIX, no obstante, fue rápidamente desplazado por el tranvía eléctrico que tuvo su auge durante 1905 a 1910, en este sentido el tranvía eléctrico suponía una ventaja superior

a las alternativas de movilidad urbana previas, pues esta era más limpia, poseía un mejor sistema de aceleración y frenado. En América Latina el tranvía eléctrico hizo su aparición en Rio de Janeiro en 1892 mientras que en Buenos Aires llegó en 1896 (CEPAL, 1994).

Al mismo tiempo que los tranvías comenzaron a circular los ferrocarriles metropolitanos, el primero del que se tiene registro fue el *Metropolitan Railway* en Londres en su tramo inaugural, empezó a operar de forma rutinaria en 1863 empleando tracción a vapor. A partir de ese momento comenzó a extenderse su uso, sin embargo, los siguientes sistemas de metro (a excepción del de Viena) funcionaron con tracción eléctrica desde su creación. En México y en Chile se emplearon variantes francesas del sistema de metro llegando en 1969 y 1975 respectivamente. Surgen entonces las dos principales tendencias de transporte público urbano, por un lado, el metro y por otro lado el tranvía electrificado. El metro se distingue del tranvía ya que a este se le designa un espacio exclusivo separado de las vialidades generales, además se le integran más coches y las paradas se encuentran más alejadas la una de la otra denominándolas estaciones. En numerosas ciudades ha optado por aplicar sistemas mixtos como los trenes ligeros o los tranvías elevados (CEPAL, 1994).

En el periodo posterior a la segunda guerra mundial y producto del rápido crecimiento demográfico urbano comienza a hacerse popular la compra de automóviles particulares, lo que llevó a la expansión de las autopistas, el uso masivo del automóvil, así como el uso de autobuses a gasolina y Diesel. Sin embargo, algo que ha quedado en evidencia es que, en los países en desarrollo como algunos de América Latina, las opciones de transporte público siguen siendo aun limitadas, no obstante, se ha demostrado que a pesar de que el transporte público en las economías desarrolladas es más diversificado el sistema ferroviario sigue siendo considerablemente menos empleado que los autobuses solo exceptuando ciudades como Nueva York o Tokio (CEPAL, 1994).

2.2.3 Relación del transporte público con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

La Organización Naciones Unidas (ONU) menciona que la guía de referencia de trabajo internacional hacia la sostenibilidad se titula Agenda 2030. Esta agenda fue aprobada por los 193 estados miembros y fue aprobada en septiembre de 2015, supone un compromiso adquirido tanto

por países desarrollados como por países en desarrollo que toma en cuenta mecanismos para implementar las transformaciones necesarias para cambiar las modalidades de desarrollo (ONU, 2015).

En su preámbulo la agenda establece los tres ejes principales a los que va dirigido: las personas, el planeta y la prosperidad. Hace hincapié en la erradicación de la pobreza como un factor indispensable para alcanzar el desarrollo sostenible. La agenda pretende retomar los objetivos de desarrollo del milenio que no fueron alcanzados, tiene también como finalidad lograr un desarrollo en tres dimensiones: económico, social y ambiental que son las que dan cabida al desarrollo sostenible (ONU, 2015).

La agenda plantea 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y 169 metas las cuales se esperan a ser cumplidos 15 años después de su planteamiento, es decir, en el año 2030, de ahí que reciba ese nombre. En el eje de El planeta se estipula: “la gestión sostenible de sus recursos naturales y medidas urgentes para hacer frente al cambio climático” (ONU, 2015, p.2) mientras que en el eje de prosperidad se describe a grandes rasgos como: “que el progreso económico, social y tecnológico se produzca en armonía con la naturaleza” (ONU, 2015, p.2).

La movilidad sostenible o los sistemas de transporte público sostenible no fueron contemplados como un objetivo independiente dentro de la agenda 2030, esto genera un vacío de liderazgo mundial, pues no existen políticas claras que orienten a la comunidad internacional en este sector específico en la Agenda 2030 (Mohieldin y Vandycke, 2017). No obstante, es posible vincular la movilidad sostenible con algunos objetivos de la agenda internacional. La discusión sobre los objetivos en los que indirectamente incide la movilidad sostenible es compleja, para ello es necesario revisar múltiples fuentes.

El Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (2024) de la ONU relaciona principalmente el objetivo 11 de desarrollo sostenible “Lograr que las ciudades y los asentamientos urbanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” (ONU, 2015, p.24). Sin embargo, este departamento también deja en claro que se relaciona de una u otra manera con otros objetivos, pues reconoce que el transporte que sigue las características de la sostenibilidad mejora la salud, la equidad social,

la resiliencia de las ciudades, así como los vínculos entre las distintas zonas geográficas. No obstante, se reitera el argumento de Mohieldin y Vandycke (2017) relacionado a la falta de claridad de la relación de los ODS con la movilidad sostenible.

Al respecto, Mohieldin y Vandycke (2017) se atreven a vincular la movilidad sostenible con más objetivos específicos del desarrollo sostenible, mencionan que se vincula con el objetivo número 7 “Garantizar acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos” (ONU, 2015, p.22) debido a que con el desarrollo de transporte sostenible se puede reducir el consumo de combustibles fósiles. De igual manera, estos autores relacionan el paradigma de movilidad sostenible con el objetivo número 9 “construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación” (ONU, 2015, p.23)

La UITP (2023) vincula el transporte público sostenible con los objetivos 3, 5, 8, 10, 13 y 17 además de algunos de los ya mencionados como el 11. El objetivo número 3 indica: “garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades” (ONU, 2015, p.18) ya que supone que una disminución en la contaminación del aire al optar por medios de transporte de bajas emisiones y la reducción en el uso del automóvil particular puede mejorar la calidad del aire y con ello la salud de las personas.

El objetivo 5 señala: “Lograr la igualdad de género y empoderar a todas las mujeres y las niñas” (ONU, 2015, p. 20) para ello se requeriría trabajar en políticas contra la violencia de género en los espacios del transporte público. El objetivo 8 busca: “Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo y el trabajo decente para todos” (ONU, 2015, p.22). La UITP (2023) sostiene la tesis de que el transporte público fomenta el crecimiento económico y la generación de empleos.

Por otro lado, el objetivo 10 plantea “reducir la desigualdad ente los países y entre ellos” (ONU, 2015, p. 24) mientras que el objetivo 13 tiene como finalidad: “adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (ONU, 2015, p. 26) y el objetivo 17 estipula “Fortalecer los medios de implementación y revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible” (ONU, 2015, p.30)

Por último, el artículo de Spandou y Macário (2021) parte de las implicaciones generales en las cuales el transporte público tiene un impacto positivo. En primera instancia se menciona la relación entre el transporte público y la reducción de la pobreza, respecto a este eje de la agenda 2030 se explica que el transporte público puede contribuir directa o indirectamente a incrementar el nivel de vida acercando las actividades urbanas como educación, salud o trabajo. De igual manera argumenta que la cobertura, la accesibilidad y la asequibilidad son las dimensiones más importantes del transporte público que ayudan a conseguirlo.

En cuestión al transporte y la seguridad, se indica que la oferta pública tiene impactos en la salud, en el corto, mediano y largo plazo. En el corto plazo el transporte público puede contribuir a la reducción de accidentes de tránsito, sin embargo, se aclara que esto debe de ir acompañado de una política que monitoree el comportamiento de los operadores, así como el establecimiento de paradas seguras y medidas de protección al peatón (Spandou y Macário, 2021).

En general, Spandou y Macário (2021) vinculan el desarrollo del transporte sostenible con 15 de los 17 objetivos de desarrollo sostenible. A diferencia de las fuentes anteriores, logran vincular el objetivo 1 “Poner fin a la pobreza en todas sus formas y en todas partes del mundo” (ONU, 2015, p.17), lo relacionan con la capacidad que tiene el transporte público con garantizar el empleo y el crecimiento económico y la movilidad para usuarios vulnerados. En cuestión al objetivo 4 “Garantizar una educación inclusiva y equitativa de calidad y promover oportunidades de aprendizaje permanente para todos” (ONU, 2015, p.19), señalan el vínculo que tiene el transporte público en movilizar a los estudiantes en todos sus niveles.

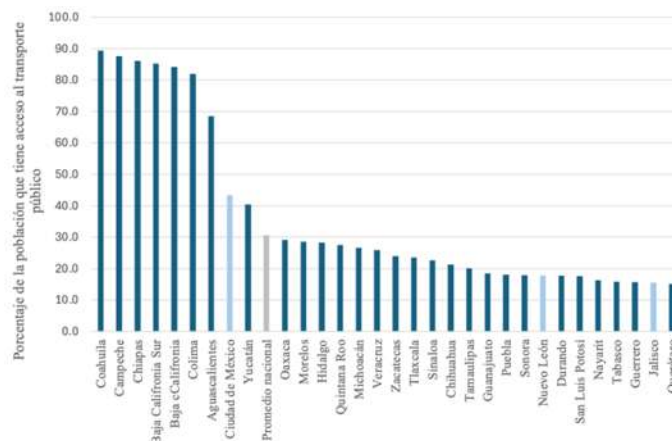
A partir de las fuentes revisadas y en especial el artículo elaborado por Spandou y Macário (2021) queda en evidencia que el transporte público sostenible tiene un impacto significativo en el cumplimiento de la agenda de desarrollo sostenible, donde a pesar de no quedar establecido de forma clara, sus propias características logran estar presentes en las tres dimensiones de lo que es considerado como sostenible: la dimensión ambiental, económica y de asequibilidad. A partir de una reflexión más profunda se puede relacionar el transporte público sostenible se encuentra vinculado casi todos los objetivos de desarrollo sostenible.

2.3 Estado actual del transporte público en México

El acceso a los sistemas de transporte público es una de las principales preocupaciones en torno al objetivo 11 de la agenda de desarrollo sostenible “Ciudades y Comunidades Sostenibles”. De acuerdo con datos del Programa para los Asentamientos Humanos (UN-Habitat, 2021) México presenta un desempeño desigual como se puede observar en la siguiente gráfica:

Figura 2.1

Porcentaje de la población en México que tiene acceso al transporte público por entidad federativa para el año 2020



Nota: Porcentaje de la población urbana que tiene acceso a paradas de transporte público, es decir, que se encuentran a 500 metros de distancia de un modo de transporte de baja capacidad y a 1000 metros de un medio de transporte masivo.

Fuente: elaboración propia con base en los indicadores de UN-Habitat (2021)

Como es posible observar en la figura 2.1 en México las condiciones de acceso a los servicios de transporte público son desiguales en las distintas entidades federativas del país. El estado que mayor nivel de acceso presenta es Coahuila (89.3 %), seguido de Campeche (87.5 %). En los últimos lugares se encuentran los estados de Jalisco (15.6 %) y Querétaro (15.1 %). La media nacional es de 30.7 % lo que indica que al menos el 69.7 % (UN-Habitat, 2021) de la población que se localiza en las zonas urbanas no tiene un acceso adecuado al transporte público. El estado del acceso al transporte público en México abre el debate sobre políticas que se encuentren

orientadas a incrementar la oferta de estos tipos de servicios, sin embargo, también se debe tomar en cuenta la calidad de estos.

2.3.1 Oferta de transporte público en México

En cuestión a la oferta de servicios de transporte público urbano estos son diversos, sin embargo, la mayoría se encuentra localizado en las zonas con mayor concentración de población como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 2.3

Modos de transporte público en México con base en información de 2020

Modo de transporte (movilidad)	Sistema (ciudades)	Demanda de viajes al día (Millones por ciudades)
Autobús de Tránsito Rápido / Corredores	10 ciudades	7
Trenes	20 líneas agrupadas en 4 sistemas de transporte (4 ciudades)	7
Trolebuses	2 sistemas (2 ciudades)	0.1
Teleférico	3 líneas en 2 sistemas de transporte (2 ciudades)	0.2
Autobuses con pago electrónico	5 ciudades	2
Autobuses sin transporte masivo	2 ciudades	1
Autobuses y vagonetas (combi)	72 zonas metropolitanas	62

Fuente: elaboración propia con base en Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial (2024)

A partir de la tabla 2.3 es posible distinguir que los modos de transporte público urbano más común en México son los autobuses y vagonetas ya que se encuentran presentes en 72 zonas metropolitanas y tienen una alta demanda de 62 millones de viajes en total de todas las ciudades donde operan. Le siguen los Autobuses de Tránsito Rápido (BTR) presentes en 10 ciudades y con una demanda de 7 millones de viajes. A pesar de que los trenes tienen el mismo nivel de demanda que los BTR estos solo se encuentran 4 ciudades.

Los 4 sistemas de tren urbano de pasajeros son: Sistema de Transporte Colectivo (Metro) de la Ciudad de México, Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) de Guadalajara, Jalisco, Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) en Monterrey, Nuevo León y el Tren Ligero del Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México.

2.3.2 Marco normativo de la movilidad urbana en México

Con la finalidad de establecer de manera acertada los fines y las atribuciones de las entidades responsables de la movilidad en México y en específico de los sistemas de tren urbano que se están analizando se presenta a continuación el marco normativo en torno a estos servicios. En primer lugar, es importante clarificar de manera legal el derecho a la movilidad, en seguida, se enuncian los responsables de su provisión y operación según los lineamientos legales a nivel federal, de las entidades federativas de interés y de los sistemas de tren urbano en particular.

El derecho a la movilidad aparece en México con la reforma efectuada en el año 2020 al artículo 4 constitucional el cual señala lo siguiente: “Toda persona tiene derecho a la movilidad en condiciones de seguridad vial, accesibilidad, eficiencia, sostenibilidad, calidad, inclusión e igualdad” (Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917, art. 4). Es importante hacer énfasis en los elementos de eficiencia y sostenibilidad con los cuales está relacionada esta investigación pues a partir del artículo anteriormente citado se pone en evidencia como la movilidad eficiente y sostenible es un derecho garantizado por la propia constitución la cual debe ser garantizada por todas las entidades del país.

De manera particular, el documento de carácter federal encargado de sentar los lineamientos específicos en la materia de movilidad es la Ley General de Movilidad atendiendo lo señalado por el artículo constitucional descrito en el párrafo anterior. Esta ley en su artículo noveno enuncia los elementos que conforman al derecho a la movilidad, de los cuales destaca la fracción tercera que menciona lo siguiente: “La movilidad eficiente de personas, bienes y mercancías” (Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, 2022, art. 9). La fracción cuarta: “La preservación y restauración del equilibrio ecológico ante los efectos del cambio climático” (Ley General de Movilidad y

Seguridad Vial, 2022, art. 9). Así como la fracción quinta que determina que el derecho a la movilidad se sustenta en “La calidad de los servicios de transporte y de la infraestructura vial” (Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, 2022, art. 9). Las fracciones anteriores hacen necesaria la descripción puntual de estas dimensiones para lo cual se integran en esta ley los artículos 15, 16, 17, 18 y 19.

La eficiencia está descrita en la ley general de movilidad en el artículo decimoquinto el cual enuncia lo siguiente: “Las autoridades deben, en todo tiempo, maximizar los desplazamientos ágiles y asequibles, optimizando los recursos ambientales y económicos, y hacer uso de las tecnologías de la información y comunicación disponibles” (Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, 2022, art. 15). Es importante distinguir que de acuerdo con esta ley los recursos deben ser empleados de manera óptima y se deben usar las herramientas adecuadas que permitan la mejora de los servicios, esto representa un importante desafío, pero un claro deber de las dependencias gubernamentales encargadas de la provisión de estos servicios.

En relación con la sostenibilidad y con estrecha relación al artículo anterior la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial la define en su artículo decimosexto como:

Las autoridades, en sus ámbitos de competencia, deberán satisfacer los requerimientos de movilidad procurando los menores impactos negativos en la calidad de vida de las personas, en la sociedad y en el medio ambiente, asegurando las necesidades del presente sin comprometer los derechos de futuras generaciones. (Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, 2022, art. 16)

Lo cual en conjunto con el artículo décimo quinto se entiende como el uso optimizado de los recursos con la finalidad de garantizar una movilidad que considere el bienestar social, personal y ambiental, es decir, generando el menor impacto negativo en emisiones o degradación del medio ambiente. Bajo el mismo argumento resalta el artículo decimoséptimo el cual señala que

Las políticas en materia de movilidad deberán fomentar la resiliencia de las personas, de la sociedad y del sistema de movilidad, frente a los efectos negativos del cambio

climático [...] Asimismo, las autoridades competentes aplicarán medidas para controlar y reducir los efectos negativos en la sociedad y en el medio ambiente... (Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, 2022, art. 17)

El artículo anterior obliga a las entidades correspondientes a monitorear y reducir los impactos ambientales que generen los servicios relacionados con la movilidad lo que agrega mayor responsabilidad a los encargados de los servicios ofertados por las entidades públicas locales como lo es el Sistema de Transporte Colectivo (Metro). Esto queda mayormente especificado en el artículo decimotercero que menciona lo siguiente:

Las políticas en materia de movilidad que se determinen por las autoridades de los tres órdenes de gobierno promoverán e incentivarán la gradual adopción de las innovaciones tecnológicas en los sistemas aplicados al transporte, vehículos, combustibles, fuentes de energía e infraestructura. (Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, 2022, art. 18)

En este sentido se hace responsable a los tres niveles del gobierno la mejorara de manera gradual la tecnología en el transporte como una obligación de los ayuntamientos, estados y de la federación. La implementación de nuevas tecnologías puede (de ser logrado de manera adecuada) coadyuvar a la mejora en la dimensión sostenible y de la eficiencia como lo mencionan cumpliendo cabalmente lo dispuesto en los artículos anteriores.

En relación con las leyes locales, en la Constitución Política de la Ciudad de México se establece en su artículo decimotercero, inciso “E”, numeral 1 y 2 el derecho a la movilidad bajo las condiciones establecidas en la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial, es decir, en el marco de la seguridad, accesibilidad, comodidad, eficiencia, calidad e igualdad así como la conformación de un sistema de transporte público integrado con énfasis en los transportes de bajas emisiones, De igual forma, la Constitución Política del Estado de Jalisco en su artículo 4 establece el derecho a la movilidad bajo las condiciones previamente señaladas (Constitución Política de la Ciudad de México, 2017, arts. 13; Constitución Política del Estado de Jalisco, 1917, art. 4).

Vale la pena hacer énfasis en la Constitución Política del Estado de Nuevo León en la cual no sólo se garantiza el derecho a la movilidad bajo los términos previamente mencionados, también se menciona el papel principal de los sistemas de transporte público “Todas las personas tienen derecho a un transporte público de calidad, digno, eficiente, accesible inclusivo y con altos niveles de cobertura territorial” (Constitución Política del Estado Libre y Soberano de Nuevo León, 1917, art. 49). En relación con lo anterior, en este mismo artículo se señala la responsabilidad que tiene el Estado en la implementación de un sistema integral orientado a los usuarios y buscando incentivar medios de transporte de bajas emisiones y su responsabilidad de dotar los recursos necesarios para aumentar la oferta y demanda del servicio.

El marco normativo del STC (Metro) involucra al reglamento de la Ley de Movilidad de la Ciudad de México en el cual en su artículo octagésimo se establece que las condiciones de prestación del servicio público de transporte sean llevadas a cabo con eficiencia. Además, en su artículo ducentésimo vigésimo tercero se responsabiliza su cumplimiento a la administración pública de la Ciudad de México. De forma concreta, en su artículo sexto se indica que el Comité de Sistema Integrado de Transporte Público debe realizar el diseño, implementación, ejecución y evaluación de la articulación física y operación del Sistema Integrado de Transporte (Reglamento de la Ley de Movilidad de la Ciudad de México, 2017, arts. 6, 80 y 223).

En la delimitación más específica del marco jurídico resalta la relevancia del Estatuto Orgánico del Sistema de Transporte Colectivo. En particular el artículo vigésimo quinto señala que la Dirección General de este organismo debe organizar, controlar y evaluar al organismo. De manera más concreta la fracción sexta de dicho artículo señala el establecimiento de sistemas eficientes de los recursos de trabajo, financieros, bienes y servicios. Los actores señalados como responsables son identificados en los artículos tercero y vigésimo el cual es el Consejo de Administración con apoyo del Consejo Consultivo del Sistema de Transporte Colectivo, este último es responsable de la emisión de opiniones con respecto a la mejora del servicio, el mantenimiento de la infraestructura, equipos, material rodante e instalaciones fijas (Estatuto Orgánico del Sistema de Transporte Colectivo, 2024, arts. 3, 20 y 25).

En relación con el Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) en su reglamento interno en los artículos decimoquinto y decimonoveno se establecen las responsabilidades para la planeación, programación, organización, dirección, control y evaluación del desempeño del sistema para lo cual se debe presentar reportes estadísticos y supervisar el cumplimiento de los lineamientos establecidos, estas acciones recaen en la Dirección General así como en las Unidades Administrativas (Reglamento Interno del Sistema de Tren Eléctrico Urbano, 2024, arts. 15 y 19).

Finalmente, las responsabilidades jurídicas del Sistema de Transporte Colectivo de Nuevo León se enmarcan principalmente en la Ley de Movilidad Sostenible, de Accesibilidad y Seguridad Vial. En su artículo primero se señala que la finalidad de la ley es garantizar la movilidad bajo los criterios previamente señalados en su constitución local. En su artículo segundo se establece en su fracción séptima y octava como de interés público la eficiencia en la provisión de servicios de transporte público a partir de sus recursos de infraestructura y mobiliario, así como la transición completa y gradual hacia la electromovilidad y la implementación de energías limpias en estos servicios. En su artículo décimo catorce se establece la creación del organismo descentralizado Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey (Ley de Movilidad Sostenible, de Accesibilidad y Seguridad Vial Para el Estado de Nuevo León, 2020, arts. 1, 2 y 14).

De forma particular, en la ley que ordena la creación del STC (Metrorrey) se establece que la responsabilidad de gobierno de dicho organismo recae en el Consejo de Administración el cual tiene la obligación de autorizar acciones para la construcción, mantenimiento, rehabilitación, ampliación, incorporación y mejoramiento del servicio provistos por este organismo (Ley que crea el Organismo Público Descentralizado denominado Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey, 1987, art. 2)

2.3.3 Marco de políticas de movilidad urbana y transporte público en México

En sintonía con el marco jurídico anteriormente descrito se han propuesto una serie de las intervenciones públicas relacionadas con la movilidad y sus distintas dimensiones como el transporte público. Para esta investigación, se hace relevante la revisión de la Estrategia Nacional

de Movilidad y Seguridad Vial (ENAMOV) así como la Política Nacional de Transporte Público Colectivo Urbano (PNTPCU).

El eje rector del Gobierno de México para llevar a cabo la implementación de una Política Nacional enfocada a la movilidad es la Estrategia Nacional de Movilidad y Seguridad Vial (ENAMOV) elaborada por la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). Esta estrategia tiene como finalidad fomentar a la movilidad como una herramienta que lleve a la igualdad social a través de la generación de bienestar colaborando como una base para sostener la economía nacional a través de la infraestructura actual y futura que permita la movilización de mercancía y personas, también surge en respuesta del mandato constitucional al derecho a la movilidad en su artículo cuarto (SEDATU, 2023).

Con la implementación de la ENAMOV se pretende establecer los principios del desarrollo de la movilidad en México en el largo, corto y mediano plazo. A partir de la cual se define la visión, propósito, actividades, fines, plazos, actores responsables e indicadores que lleven a la constitución de la política nacional incorporando la colaboración y coordinación de los sectores público, civil y privado resaltando la importancia del transporte público como un componente elemental y articulador de las ciudades y un servicio de interés general (SEDATU, 2023).

Uno de los problemas identificados por la ENAMOV está relacionado con niveles deficientes de servicio y oferta en el transporte público. En relación con esto se señala que existe una profesionalización limitada de las personas que operan el transporte público y que de igual forma los sistemas institucionales enfocados en la mejora de la calidad del servicio son insuficientes.

El objetivo general de la ENAMOV es:

Garantizar el derecho de todas las personas a trasladarse y disponer de sistemas integrales de movilidad con calidad, suficiencia y accesibilidad que, en condiciones de igualdad, equidad y sostenibilidad, permitan reducir las brechas de desigualdad en el acceso de las personas al derecho a la movilidad. (SEDATU, 2023, p. 202)

En relación con los objetivos específicos resalta el impulso de acciones enfocadas en la promoción de servicios de transporte público sostenible y seguro en todo el país, considerando como prioritario la infraestructura bajo estándares de calidad, así como los grupos vulnerables y sus necesidades. Otro de los objetivos específicos se centra en el diseño y planeación de la infraestructura, normativa e instrumentos para garantizar una movilidad de calidad. De igual manera otro de los objetivos específicos hace hincapié en el desarrollo de responsabilidades, atribuciones y herramientas técnicas, institucionales, jurídicas orientadas a la transformación de la movilidad, de igual forma se habla del diseño de mecanismos que permitan un financiamiento más estratégico enfocadas a la gestión de la valorización (SEDATU, 2023).

La ENAMOV se sostiene bajo ocho principios rectores, de los cuales destaca la eficiencia e innovación y la sostenibilidad. En relación con la primera, se señala que se debe efectuar la incorporación de nuevos modelos de gestión, así como mecanismos de operación que permitan una gestión óptima. De la segunda se explica que se debe orientar a una movilidad de bajas emisiones que tome en consideración la protección del medio ambiente reduciendo los impactos ambientales producto de la movilidad. A partir de los pilares mencionados con anterioridad se establecen cinco ejes estratégicos, de los cuales destaca el segundo eje el cual consiste en el servicio de transporte público de personas (SEDATU, 2023).

En relación el servicio de transporte público de personas la ENAMOV propone el siguiente objetivo general:

Impulsar los servicios de transporte público de personas para que éstos sean asequibles, eficientes, sostenibles, seguros, de calidad, accesibles, inclusivos e integrados, que atiendan las desigualdades socioespaciales y las movilidades desiguales de género, discapacidad, edad, etnicidad y territorialidad (urbana, rural e insular). (SEDATU, 2023, p.216)

El primer objetivo específico tiene como finalidad el ordenamiento de los servicios de transporte público a partir de un marco operativo, institucional y jurídico-normativo el cual garantice la provisión de estos servicios con eficiencia. De este objetivo resaltan el subobjetivo 2.1.7 en el cual se busca el fortalecimiento de las instituciones encargadas de la calidad del servicio de transporte

público con la finalidad de mejorar su desempeño y establecer los lineamientos de evaluación y mejora de la gestión general de los sistemas. En sintonía con el subobjetivo anterior se destaca el 2.1.8 que tiene como propósito la constitución de lineamientos normativos y técnicos para el diagnóstico físico-mecánico y documental del material rodante. También destacan los subobjetivos 2.1.11 y 2.1.12 los cuales proponen la inclusión de Tecnologías de la Información y Comunicación avanzadas que permitan obtener información de utilidad para los operadores de los servicios y los usuarios (SEDATU, 2023).

El segundo objetivo específico de la ENAMOV está relacionado con la cobertura, confiabilidad y accesibilidad de los servicios de transporte público. De este objetivo destaca el subobjetivo 2.2.6 el cual se centra en la elaboración de lineamientos que permitan la incorporación de sistemas inteligentes de transporte que sean vinculados a los sistemas de transporte público. Uno de los subobjetivos más relevantes para esta investigación es el 2.2.7 el cual habla de la construcción de lineamientos que permita la optimización de las rutas de transporte público evitando sobredimensionamiento y planeación equívoca de las frecuencias a partir de datos de la demanda obtenidos por medio de procesos de digitalización. Por último, otro de los subobjetivos relevantes es el 2.2.9 el cual tiene como propósito la digitalizar y facilitar el acceso a la información que se genera en estos servicios, con la finalidad mejorar la toma de decisión en cuanto a su operación y funcionamiento (SEDATU, 2023).

Finalmente, el tercer objetivo específico se encuentra en total sintonía con esta investigación pues se centra en la operación, regulación y supervisión de los servicios de transporte público. En específico el subobjetivo 2.3.10 se centra en la inversión estratégica en transporte pues se busca establecer lineamientos de priorización de dotación de recursos fiscales provenientes del Fondo de Aportaciones para la Infraestructura Social (FAIS) con mira a la mejora de los servicios de transporte público. Así como el 2.3.11 que tiene que ver con el reemplazo del material rodante buscando alternativas más eficientes, que disminuyan la demanda de energía eléctrica y den un mejor servicio. Por último, el subobjetivo 2.3.13 se encuentra orientado hacia la dotación de infraestructura que permita el mejor mantenimiento de las unidades (SEDATU, 2023).

Las actividades propuestas por la ENAMOV son más generales y no están enfocadas a los objetivos específicos, sin embargo, resaltan aquellas enfocadas al financiamiento, en específico a la actividad nueve en la cual se incita a realizar una reingeniería financiera del Programa de Apoyo Federal al Transporte Masivo (PROTRAM) para lo cual se proponen algunos criterios, como el establecimiento de una metodología que permita la evaluación del desempeño de los proyectos de inversión en el transporte público, la consolidación de un programa federal enfocado a la mejora de las flotas, infraestructura y equipos de transporte público, así como sistemas de transporte públicos basados en la profesionalización de la operación, gestión y administración (SEDATU, 2023).

En términos del monitoreo y evaluación de la ENAMOV se establece la existencia de los siguientes indicadores que son considerados como incidentes en la dimensión de sistemas de transporte público son base en SEDATU (2023):

- Medio ambiente
 - ENV-01: Emisiones de dióxido de carbono equivalentes (CO₂eq) por el autotransporte
- Transporte público – Sistemas de transporte
 - TP-ST-01: Cantidad de unidades en operación en los Sistemas Integrados de Transporte
 - TP-ST-03: Cantidad de pasajeros transportados anualmente

En relación con los indicadores por desarrollar se hace la propuesta de incorporar el de rutas y frecuencia operativa del transporte público, con el cual se espera recuperar información amplia sobre las rutas de transporte público donde se incluya la frecuencia, la capacidad del material rodante, que pueden ser empleados como indicadores de la calidad del servicio, así como su costo. Este tipo de información permitiría una planeación y gestión eficiente de los sistemas de transporte público. De igual manera se propone el indicador de caracterización de la flota la cual puede aportar información relevante en torno al número de unidades, tipo de vehículo, antigüedad, tecnología, frecuencia de mantenimiento, desempeño, capacidad, entre otras características (SEDATU, 2023).

Con gran relevancia para esta investigación se señalan los indicadores de desempeño propuestos para la evaluación de la implementación de la ENAMOV, los cuales consideran la medición, evaluación y monitoreo como una de sus dimensiones principales, se mide en que proporción se han incorporado metodologías de nueva creación, metodologías por actualizarse, acciones de transparencia, así como acciones de participación ciudadana (SEDATU, 2023).

La Política Nacional de Transporte Público Urbano (PNTPCU) surge a partir de los objetivos planteados por la ENAMOV. Esta política tiene como propósito reducir la priorización de esquemas de transporte obsoletos basados en el transporte individual y concesionario deficiente. Se establece que esta herramienta permitirá a los gobiernos locales establecer un conjunto de lineamientos para la determinación de los modelos de gestión en la operación de los servicios de transporte público que cumplan con los criterios de eficiencia, seguridad y empleen nuevas tecnologías. A partir de lo cual se pretende la generación de programas operativos que establezcan acciones y actividades concretas orientadas a el mejoramiento sustancial de los servicios de transporte público (Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, 2024).

El objetivo general de la PNTPCU es garantizar el derecho a la movilidad bajo los criterios previamente señalados que aparecen en la Constitución y en la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial. Se establecen cuatro dimensiones principales en la constitución de la política: entorno urbano, oferta del transporte, las autoridades y los prestadores del servicio (Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, 2024). En este sentido, el objetivo general se encuentra desagregado en cuatro objetivos prioritarios:

- 1) las ciudades facilitan el transporte público colectivo urbano, 2) la oferta del transporte público colectivo al servicio de todas las personas, 3) instituciones de gobierno responsables del transporte público colectivo y 4) los prestadores de servicio con una operación sana del transporte público colectivo (Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, 2024, p.51)

Para fines de este se hace una selección estratégica de los objetivos, actividades y lineamientos de la PNTPCU que se vinculan con los objetivos de esta investigación, para lo cual se agrupan en

diferentes dimensiones, por un lado, la medición de la eficiencia, por otro la planeación y optimización operativa y por otro la inversión estratégica en transporte. Para lo cual se recurre a la tabla 2.4:

Tabla 2.4

Objetivos de la PNTPCU alineados con esta investigación

Dimensión	1) Evaluación del desempeño y medición de la eficiencia		
Actividad	Descripción	Línea de acción	Objetivo Prioritario
7.1	Definir estándares de sistemas de información y evaluación de los sistemas de transporte	Priorizar las condiciones que ofrecen seguridad de viaje a los grupos con vulnerabilidad social.	2
9.3	Modernizar los sistemas de monitoreo de la operación del transporte público.	Garantizar la certeza jurídica para la planeación, operación, regulación, monitoreo y control del transporte público.	3
6.1	Establecer sistemas de control operativo de flota vehicular.	Impulsar estándares de diseño y calidad en los servicios de transporte público a partir de soluciones tecnológicas que permitan la descarbonización del sector.	2
Dimensión	2) Planeación y optimización		
Actividad	Descripción	Línea de acción	Objetivo prioritario
9.2	Promover el desarrollo de Planes Estratégicos de transformación del transporte público colectivo urbano	Garantizar la certeza jurídica para la planeación, operación, regulación, monitoreo y control del transporte público.	3
6.4	Generar infraestructura de apoyo a la operación para las empresas o grupos concesionarios del transporte público.	Generar infraestructura de apoyo a la operación para las empresas o grupos concesionarios del transporte público.	2
11.2	Implementar programas de renovación de flota.	Desarrollar mecanismos para el financiamiento de proyectos de servicios de transporte para diferentes escalas.	3
13.1	Incentivar el fortalecimiento del proceso de revista vehicular y mantenimiento de la flota de transporte público	Fortalecer las capacidades para la prestación de servicios auxiliares para el transporte público (impulsar el financiamiento de proyectos de servicios auxiliares).	4
Dimensión	3) Inversión y financiamiento estratégico en transporte		
Actividad	Descripción	Línea de acción	Objetivo prioritario
11.1	Impulsar esquemas de asignación de recursos en transporte público colectivo	Impulsar esquemas de asignación de recursos en transporte público colectivo	3

Fuente: elaboración propia con base en Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial (2024)

Es importante aclarar que la PNTPCU delimita acciones específicas de acuerdo con distintas dimensiones de la operación de los servicios de transporte público para lo cual implementa un

esquema de integración y modelo de gestión. En el primero se considera la existencia de los componentes físicos, las ofertas operativas, tarifas y de información e imagen del sistema integrado de los servicios de transporte público para lograr una interacción que permita la unidad, accesibilidad, eficiencia y cohesión con el sistema. El segundo hace referencia al nivel de involucramiento de las autoridades gubernamentales en la operación de los servicios de transporte público (Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, 2024).

En relación con los indicadores la PNTPCU propone indicadores de impacto, así como indicadores de proceso o monitoreo. Los que se encuentran relacionados con los objetivos descritos con anterioridad se muestran a continuación (Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, 2024):

- Indicadores de impacto
 - Emisiones de GEI por transporte público colectivo
- Indicadores de monitoreo
 - Consumo de energía
 - Instrumentos normativos

La propia PNTPCU hace hincapié en que estos indicadores más que limitativos son enunciativos y que se deben de adaptar de acuerdo con las características y necesidades de cada sistema (Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, 2024).

2.3.4 Estado de la movilidad urbana en Ciudad de México, Nuevo León y Jalisco

Para sintetizar el estado de la movilidad urbana en las principales ciudades de México donde se oferta el servicio transporte público ferroviario urbano se rescata el informe elaborado por el IMCO (2019b) donde se comparte el resultado del índice de movilidad urbana general y en las principales ciudades de México los cuales se presentan en la Tabla 2.5 donde además se incluyen 5 subíndices relevantes para el análisis de movilidad urbana.

Tabla 2.5

Resultados generales del ranking elaborado con el índice de movilidad urbana y sus subíndices de las zonas urbanas de México donde se oferta el servicio de tren de pasajeros

Ciudad	Nivel de competitividad general	Transporte seguro	Accesibilidad y funcionamiento de la infraestructura urbana	Eficiencia y transparencia gubernamental	Regulación y políticas públicas en favor de la movilidad
Valle de México	Adecuada	Media-baja	Media-alta	Adecuada	Adecuada
Guadalajara	Adecuada	Media-alta	Adecuada	Media-alta	Adecuada
Monterrey	Media-baja	Media-baja	Adecuada	Baja	Media-alta

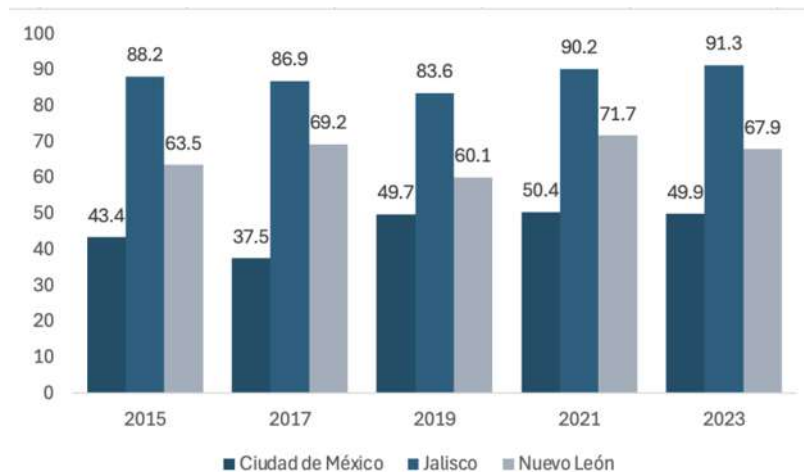
Fuente: elaboración propia con base en IMCO (2019b)

Como se puede observar en la Tabla 2.5, los resultados entre las principales zonas urbanas de México, así como entre los subíndices evaluados, retratan una evidente heterogeneidad. De los asentamientos urbanos analizados, ningún alcanzó el grado de desempeño alto en la clasificación general ni en ninguna de las evaluaciones específicas relacionadas con la seguridad del transporte, la accesibilidad o eficiencia institucional. Esto sugiere una brecha significativa entre la eficiencia operacional de las instituciones y el estado de competitividad de la movilidad urbano donde se operan los servicios de tren de pasajeros.

La percepción ciudadana de los sistemas de tren de pasajeros ha sido cambiante a lo largo de su historia, lo cual puede ser un retrato sobre diferencias en las acciones como en su operación y ampliaciones, para ello, resulta relevante revisar como han sido estos cambios los cuales pueden ser observados en la siguiente figura:

Figura 2.2

Porcentaje de la población que se encuentra satisfecha con los servicios de transporte público ferroviario urbano en los años 2015 - 2023 en las entidades que ofrecen este servicio



Fuente: elaboración propia con base en los tabulados de la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG) del INEGI (2024)

Como se puede observar, la entidad con mejores niveles de aprobación del servicio de tren urbano de pasajeros es Jalisco la cual pasó del 88.2% de aprobación en 2015 al 91.3% en 2023. Le sigue el estado de Nuevo León con el 63.5% de la ciudadanía satisfecha con este servicio en 2015 y de 67.9% en 2023. Por último, el sistema urbano de trenes de pasajeros peor evaluado ha sido el de la ciudad de México, si bien, la percepción ciudadana ha mejorado en 2023 (49.9%) este sistema ha mantenido históricamente niveles considerablemente bajos de satisfacción con respecto a los demás servicios similares. De tal modo que resulta imperativo indagar a mayor profundidad de qué manera se han comportado los productos e insumos con los que cada sistema opera.

2.4 Sistemas de transporte público ferroviario urbano de México

En México, uno de los principales sistemas de transporte público urbano masivo son los transportes ferroviarios urbanos los cuales históricamente se han desarrollado en las principales zonas metropolitanas de país lo cual responde a una de las principales características de este tipo de sistemas señaladas por Vuchic (2007) quien sostiene que para que estos modos de transporte sean

óptimos deben ubicarse en áreas de alta demanda, por ello no resulta fortuitito que estos sistemas estén concentrados en las principales zonas metropolitanas de México como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 2.6
Características demográficas y espaciales de las zonas metropolitanas donde existen sistemas de transporte urbano ferroviario del año 2020

Zona metropolitana	Población total	Tasa de crecimiento poblacional anual con respecto a 2010 - 2020	Superficie ocupada (hectáreas)	Densidad de población (hectáreas /habitantes)
Ciudad de México	21,436,911	0.78	244 937.4	87.5
Monterrey	5,322,117	2.47	111 938.8	47.5
Guadalajara	5,110,617	1.56	73 080.4	69.9

Fuente: elaboración propia con base en Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial (2024)

El Sistema de Transporte Colectivo (Metro) fue creado a partir de una publicación en el Diario Oficial de la Federación del 29 de abril de 1967 por órdenes del entonces presidente Gustavo Díaz Ordaz. Fue concebido como un organismo descentralizado del entonces llamado Distrito Federal se le adjudicó la responsabilidad de organizar y establecer los medios y sistemas de transporte de pasajeros que lo realicen en forma segura rápida y cómoda, en esta misma publicación se ordenó a este organismo la consulta de la viabilidad de implementar un tren rápida movido por energía eléctrica con recorridos subterráneos y superficiales (Departamento del Distrito Federal, 1967).

Las obras para la construcción de la primera línea (línea 1) del Metro de la Ciudad de México iniciaron el 19 de junio de 1967, proyecto que fue concluido en su primer tramo después de 27 meses con una extensión de 12.6 kilómetros con 16 estaciones, con las estaciones terminales de Chapultepec y Zaragoza (Sistema de Transporte Colectivo Metro, 2019) De 1970 a 1981 se inauguraron los tramos iniciales de las líneas 2,3, 4 y 5. Mientras que durante el periodo de 1983 a 1999 se iniciaron las operaciones de las líneas 6, 7, 9, A. y B. Después de 13 años se inauguró la línea 12 en el año de 2012 (Sistema de Transporte Colectivo Metro, 2025a).

Durante el periodo de 1994 a 1996 se aprobaron reformas a la constitución que eliminaron la responsabilidad y competencia del gobierno federal del entonces Distrito Federal, dotándolo de autonomía gubernamental pero que también lo obligaba a coordinar las dependencias administrativas internas con la finalidad de la resolución de los problemas públicos dentro de su competencia, estos cambios aplicaron al Sistema de Transporte Colectivo (Metro) que a partir de ese momento fue administrado totalmente por el gobierno del Distrito Federal (ahora Ciudad de México) con su recurso presupuestario disponible (Blancas *et al.*, 2018).

El Sistema de Tren Eléctrico Urbano fue instaurado como un organismo descentralizado a partir de una publicación en el Periódico Oficial del Estado de Jalisco el 14 de enero de 1989, se le asignó el objetivo de prestar servicio público de transporte urbano masivo de pasajeros. Fue de esta manera como se consolidó la creación de la línea 1 de este sistema la cual requirió una construcción de 15.5 kilómetros de vía con 19 estaciones. La línea 2 comenzó su construcción en 1992 y dos años después dieron inicio sus operaciones sumando a la red 8.5 kilómetros de vía y 10 estaciones siendo todas ellas subterráneas (Gobierno del Estado de Jalisco, 2019).

Uno de los eventos recientes de mayor importancia con respecto al Sistema de Tren Eléctrico Urbano fue la expansión del sistema con la creación de su tercera línea, la cual dio inicio a sus operaciones en septiembre de 2020 permitiendo la conexión entre los municipios de Guadalajara, Zapopan y Tlaquepaque, tiene una extensión total de 21.45 kilómetros con 18 estaciones que son tanto subterráneas como elevadas (Gobierno del Estado de Jalisco, 2022).

El Sistema Transporte Colectivo (Metrorrey) fue creado como organismo descentralizado del Gobierno de Nuevo León el 9 de noviembre de 1987, la construcción de la línea 1 comenzó en 1988 e inició operaciones el 25 de abril de 1991. La primera fase de operaciones de la línea 2 inició en 2001 la cual se amplió con la segunda fase que comenzó a operar en 2008. El sistema conecta los municipios de Guadalupe, Monterrey, San Nicolás y Escobedo (HR Ratings de México, 2020). En febrero de 2021 se inauguró la línea 3 la cual tiene la particularidad de que conecta de manera directa con la línea 2 lo que significa que el recorrido de los trenes no se detiene al final de la línea 3 ya que continúa hasta la estación terminal de la línea 2 (Alanís, 2021).

2.4.1 Desempeño general de los sistemas transporte público ferroviario urbano en México

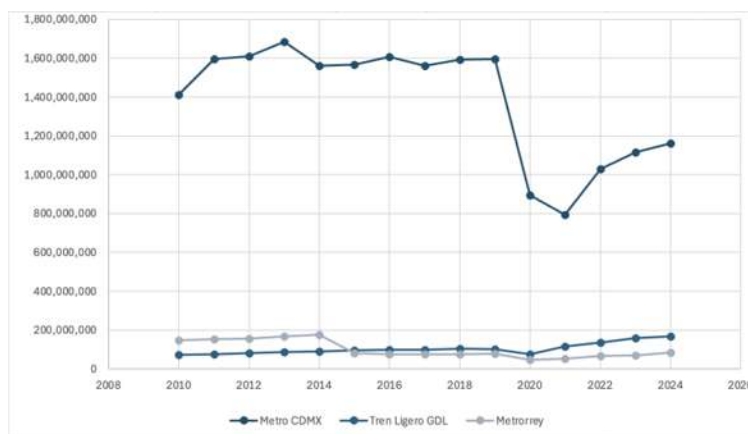
Existe un amplio debate en la literatura sobre cuáles son los principales indicadores que permiten evaluar el desempeño de los sistemas de transporte público. De acuerdo con UNESCWA (2016), los elementos que permiten evaluar el desempeño técnico de los sistemas de transporte público urbano son el número anual de viajes-pasajeros. El cual puede ser expresado como la cantidad de pasajeros usuarios del servicio durante el año y la distancia real recorrida durante el mismo periodo.

En este sentido, Henning *et al.* (2011) proponen en una publicación realizada por el Departamento para el Desarrollo Internacional del Banco Mundial que la dimensión más básica en el estudio sobre el desempeño del transporte público está relacionada con el nivel de uso. Si bien, no expresa de manera directa la calidad del transporte público permite analizar fenómenos como la afluencia y dependencia de un determinado sistema público de movilidad urbana.

En los países en desarrollo o de bajos o medianos ingresos el estudio de la demanda de transporte público es fundamental con la finalidad de analizar los factores que desincentivan su uso, por lo tanto, se entiende a este factor como uno de los productos principales de los insumos operativos que tienen los sistemas públicos urbanos de transporte y con ello alcanzar patrones de movilidad más sostenibles (Sánchez-Atondo *et al.*, 2020). Para retratar la manera en la que se comporta esta variable en los sistemas de transporte ferroviario urbano que se están analizando se presenta la figura 2.3:

Figura 2.3

Cantidad anual de usuarios de los sistemas de transporte público ferroviario urbano que se están analizando durante el año 2010 –2024



Nota: cantidad total de usuarios en términos absolutos anuales de cada sistema de tren urbano de pasajeros analizado.

Fuente: elaboración propia con base en los tabulados sobre Transporte de Pasajeros en el apartado de Economía y Sectores Productivos de INEGI (2025)

Como se puede observar, la diferencia del nivel de demanda entre el Sistema de Transporte colectivo (Metro) de la Ciudad de México con respecto a los otros dos sistemas analizados es muy marcada, esto se debe a que es el sistema con mayor antigüedad y cuenta con una mayor cantidad de líneas operativas. Los sistemas de Tren Eléctrico Urbano de la ciudad de Guadalajara, así como el Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) presentan un desempeño bastante similar entre ellos, esto puede explicarse debido a que tienen características similares con respecto al número de líneas y antigüedad.

En la revisión específica del Sistema de Transporte Colectivo (Metro), es evidente la caída en el número de usuarios durante el periodo de confinamiento por la pandemia de Covid-19 durante los años 2020-2021. En este último año el sistema tuvo los niveles más bajos de demanda, en una parte es atribuible a los rezagos causados por el confinamiento, sin embargo, es importante resaltar que en el mes de marzo de 2021 ocurrió un siniestro en la línea 12 del metro que inhabilitó sus operaciones hasta enero del 2023 que comenzó con un proceso de reapertura gradual iniciando con sus líneas subterráneas hasta enero de 2024 cuando se normalizó el servicio por completo

(Gobierno de la Ciudad de México, 2024a). De igual manera, la línea 1 de este sistema ha estado bajo proceso de remodelación desde julio de 2022 (Durán, s.f.) lo que ha provocado irregularidades en la prestación del servicio. Estos sucesos pueden explicar por qué se ha imposibilitado la recuperación de la afluencia de pasajeros en este sistema de tren urbano los cuales hasta 2024 no han podido igualar los niveles prepandemia.

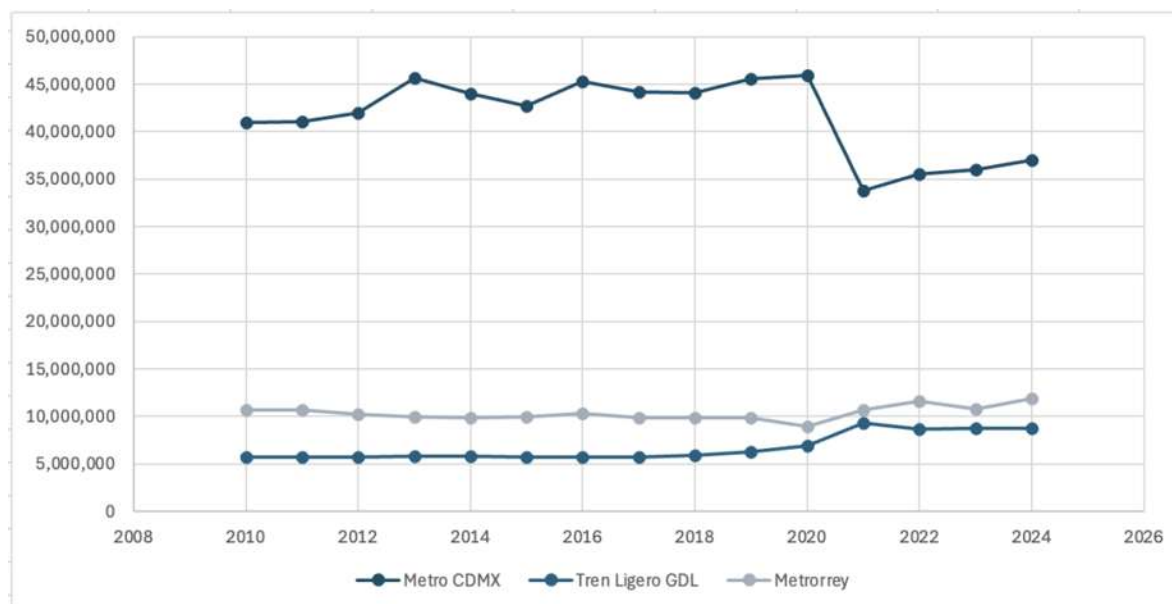
Con respecto al sistema Metrorrey, es importante distinguir que a partir de 2015 hubo una abrupta caída en la cantidad anual de pasajeros, ya que con anterioridad se mantenían niveles de afluencia constantes por encima de los 100 millones de usuarios por año. Sin embargo, desde ese periodo y hasta la fecha no se han podido superar los 80 millones de usuarios al año. Estas tendencias suponen la existencia de características particulares que han incidido en el deterioro de la demanda de este sistema.

El sistema que ha mantenido un crecimiento constante en su afluencia es el Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara. Durante el periodo revisado, este sistema era el de más baja demanda de los analizados, situación que cambió a partir de la caída de los niveles de pasajeros en 2015 en el sistema de Metrorrey, el sistema continuó con sus tendencias de crecimiento hasta el año de 2020 que –como ya se mencionó con anterioridad- sucedió el confinamiento por pandemia de Covid-19, sin embargo, de los tres sistemas que se tratan en la investigación es el que ha demostrado una mejor recuperación, la cual se ha favorecido debido a la apertura de la línea 3 en el año de 2020.

Retomando lo postulado por UNESCWA (2016) las distancias recorridas reales son un factor clave al momento de analizar el desempeño de los sistemas de transporte público. Al respecto Dumedah *et al.* (2025) lo señalan como uno de los indicadores clave que permiten operacionalizar y evaluar el desempeño de este tipo de sistemas de transporte, es una medida que permite estimar el grado de productividad de los vehículos y la intensidad real de su uso. Esta puede ser medida de manera diaria o anual dependiendo del contexto y del fenómeno que se desea estudiar. Dicho indicador puede ser entendido como producto de la eficiencia de mantenimiento de las unidades y de las vías en las que transita además de la confiabilidad general que existe en torno al manejo del sistema y de la flota (Trompet *et al.*, 2009). A continuación, se comparte la figura 2.4 que muestra el uso real de los sistemas de tren urbano.

Figura 2.4

Uso real de los sistemas de transporte público ferroviario urbano que se están analizando medido en Kilómetros recorridos durante el año 2010-2024



Nota: las cifras son absolutas en Kilómetros recorridos durante cada año.

Fuente: elaboración propia con base en los tabulados sobre Transporte de Pasajeros en el apartado de Economía y Sectores Productivos del INEGI (2025)

Como se puede observar en la figura 2.4 las tendencias son un tanto similares con respecto al número de pasajeros, la disparidad entre el Sistema de Transporte Colectivo (Metro) en comparación con a los otros sistemas es evidente, se puede atribuir una vez más a la mayor cantidad de infraestructura instalada y el tamaño de la flota.

Con respecto a los sistemas de Metrorrey y Tren Ligero de Guadalajara, los patrones vuelen a mostrarse bastante similares debido a las características que comparten estos sistemas. Sin embargo, a diferencia de los pasajeros transportados, el Metrorrey mantiene un uso más productivo de su flota mostrando resultados consistentes históricamente que se han mostrado superiores con respecto al sistema de Guadalajara, lo cual –en términos generales- expresa un mejor desempeño en el uso de los trenes y la infraestructura instalada.

2.4.2 Revisión de los insumos de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de México

Así como los productos que generan los sistemas de transporte público existe una diversa clasificación sobre los insumos con los que operan. Una manera de analizarlos está relacionada con la infraestructura requerida para su operación. Puede entenderse como la inversión necesaria o los kilómetros de vías pavimentadas (Dalton *et al.*, 2000 como se cita en Eboli y Mazzulla, 2012) que, en este caso específico, se asimila con los kilómetros de vía instalada.

En torno a la infraestructura Molinero y Sánchez (1998) mencionan que son los derechos de vía, así como las estaciones que lo conforman que determinan las paradas ya sean de paso o de transbordo, también se contemplan los garajes o espacios de resguardo para las unidades, así como los talleres de mantenimiento reparación, los patios de maniobras y las plantas alimentadoras de energía eléctrica. De modo que a continuación se muestra la cobertura de los sistemas públicos de tren urbano de pasajeros analizadas comenzando por la cantidad de estaciones, extensión y densidad que tiene cada uno de los sistemas.

Tabla 2.7

Líneas y estaciones del Sistema de Transporte Colectivo (Metro)

Sistema de tren urbano de pasajeros	Número de líneas	Número total de estaciones	Extensión total en servicio en kilómetros	Densidad de la infraestructura estaciones / km
Sistema de Transporte Colectivo (Metro) de la Ciudad de México	12	195	226.49	0.86
Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara	3	43	47	0.91
Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) de Nuevo León	3	40	40.2	0.99

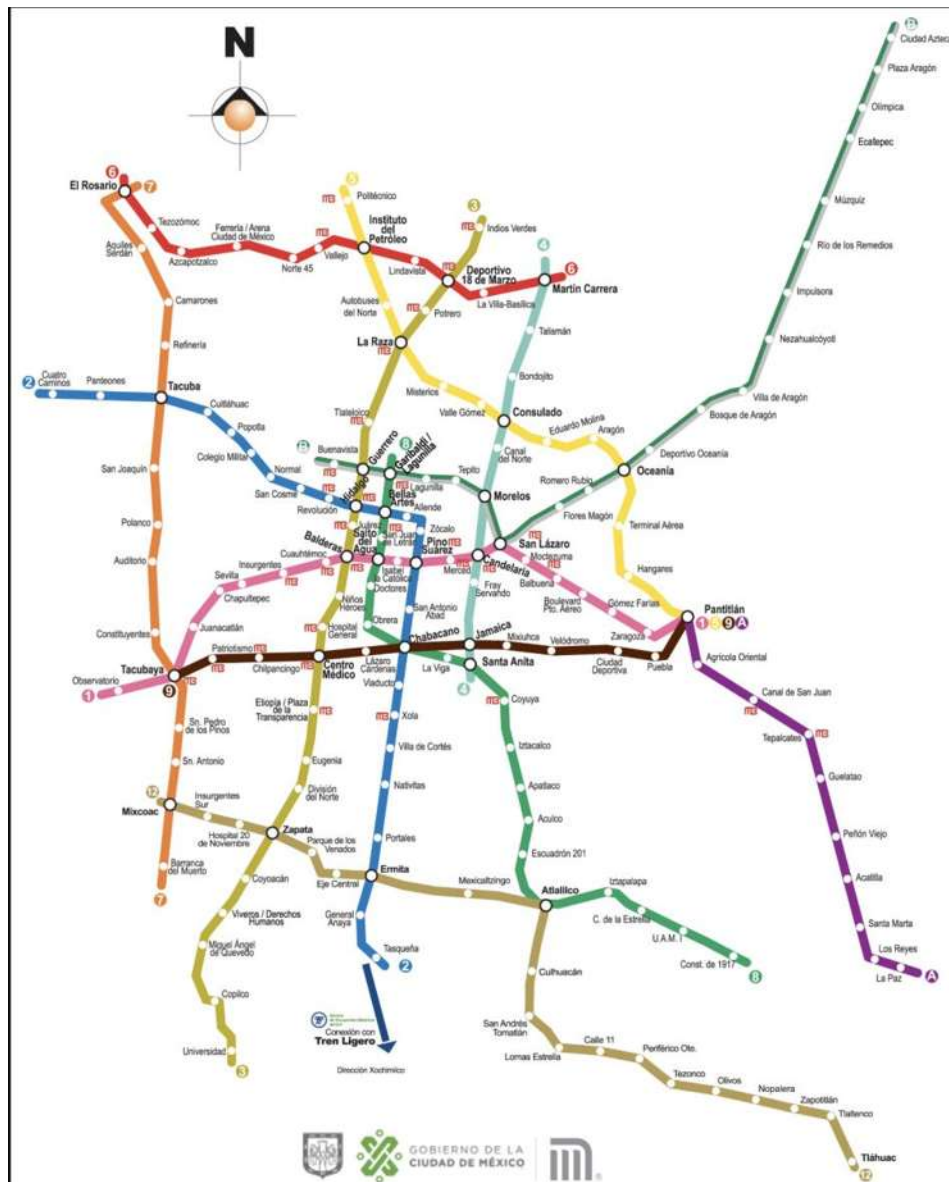
Nota: El número de líneas y de estaciones es medido por unidades, mientras que la extensión del servicio por kilómetros, mientras que la densidad de la infraestructura es el cociente entre número de estaciones sobre kilómetros de extensión en servicio.

Fuente: elaboración propia con base en Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (2023)

Como es posible observar, el sistema de Transporte Colectivo Metro de la ciudad de México es el que predomina en extensión, le sigue el sistema de Guadalajara y por último el de Monterrey. Es importante resaltar que los tres sistemas tienen una densidad de infraestructura bastante similar de entre 0.97 - 0.91 estaciones por kilómetro de línea en servicio, lo que sugiere que resulta pertinente realizar un análisis comparativo a partir de estudiar cada uno de sus componentes. Con el objetivo de visibilizar de mejor manera la distribución de cada uno de los sistemas de transporte se comparte, con el objetivo de hacer más visual el entendimiento de la distribución de la infraestructura se muestra a continuación los mapas de la red de línea.

Figura 2.5

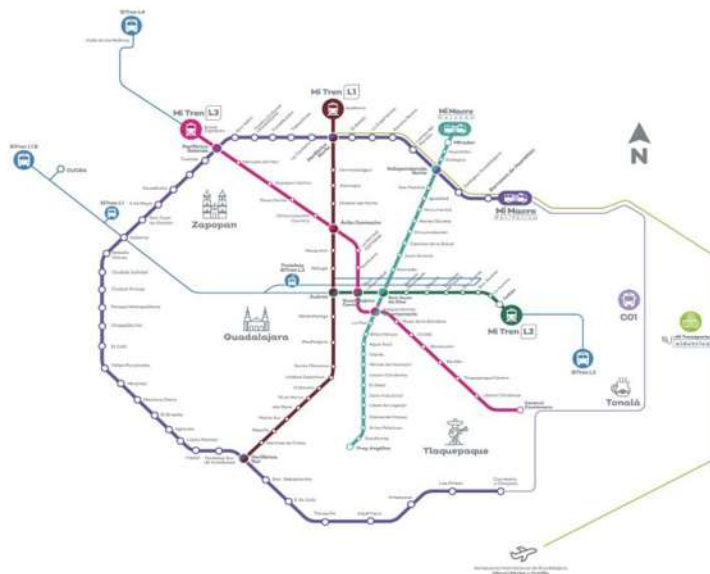
Mapa de la red del Sistema de Transporte Colectivo (Metro) de la Ciudad de México



Fuente: Gobierno de la Ciudad de México (2025)

Figura 2.6

Mapa de la red del Sistema de Tren Eléctrico Urbano de la ciudad de Guadalajara

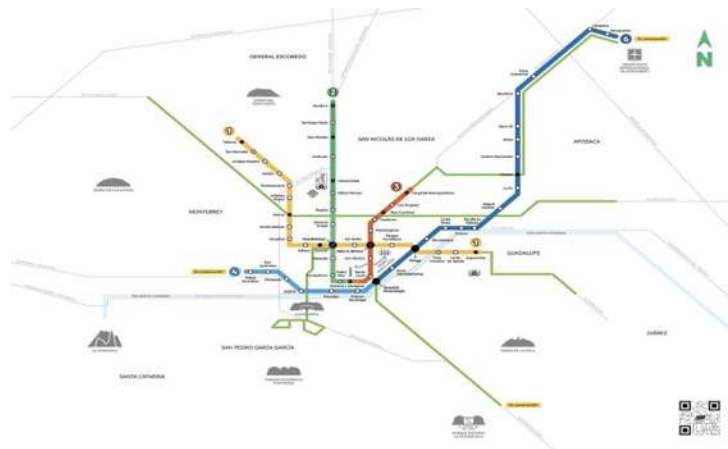


Nota: se debe distinguir que las líneas correspondientes al sistema de tren eléctrico urbano llevan el nombre de MiTren. La línea marrón corresponde a la línea 1, la línea color verde corresponde a la línea 2 y la línea color rosa corresponde a la línea 3.

Fuente: Sistema de Tren Eléctrico Urbano (2025c)

Figura 2.7

Mapa de la red del Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) de la ciudad de Monterrey



Nota: las líneas de mayor grosor corresponden a las del servicio Metrorrey, la línea color amarillo corresponde a la línea 1, la línea de color verde corresponde a la línea 2 y la línea de color naranja corresponde a la línea 3. En el mapa se incluyen la línea 4 y 6, sin embargo, estas aún se encuentran en construcción y no son operativas.

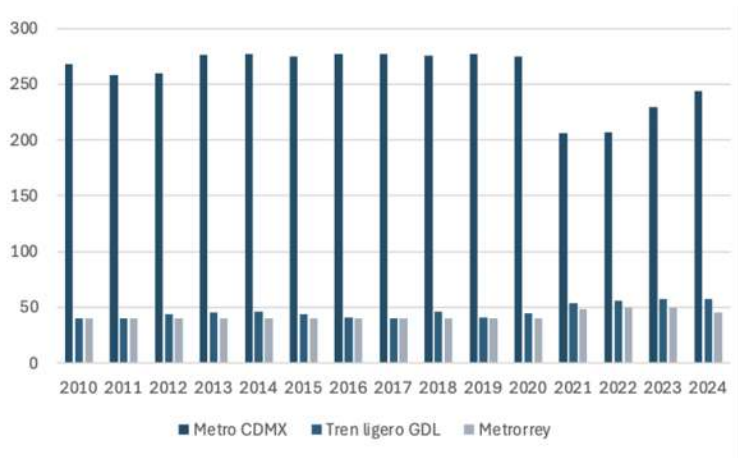
Fuente: Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey (2025b)

Retomando las ideas de Molinero y Sánchez (1998) otro de los elementos físicos con los que operan los sistemas de transporte público son los vehículos, en el caso de los transportes ferroviarios se les denomina equipo rodante, en este sentido se señala que cuando se habla de una unidad de transporte se refiere al conjunto de vehículos que conforman una sola unidad operativa a la cual se le conoce como tren.

Por lo tanto, resulta relevante contextualizar la cantidad de unidades de transporte con las que han operado cada uno de los sistemas que se están analizando con la finalidad de describir uno de los principales insumos con los que cuentan y de manera que posteriormente se tenga un panorama general al momento de realizar la evaluación de la eficiencia.

Figura 2.8

Cantidad de unidades de transporte (trenes) de los sistemas de transporte público ferroviario urbano que se están analizando, promedio anual 2010-2024



Nota: los datos presentados son en promedios anuales.

Fuente: elaboración propia con base en los tabulados sobre Transporte de Pasajeros en el apartado de Economía y Sectores Productivos del INEGI (2025)

Como es posible apreciar en la figura 2.8 los insumos vehiculares con los cuentan los sistemas de trenes urbanos que se están analizando se han mantenido generalmente constantes a lo largo del periodo descrito, el Sistema de Transporte Colectivo (Metro) de la ciudad de México es el que contiene una mayor cantidad de unidades de transporte mientras que los sistemas de Guadalajara y Monterrey tienen una flota con características similares.

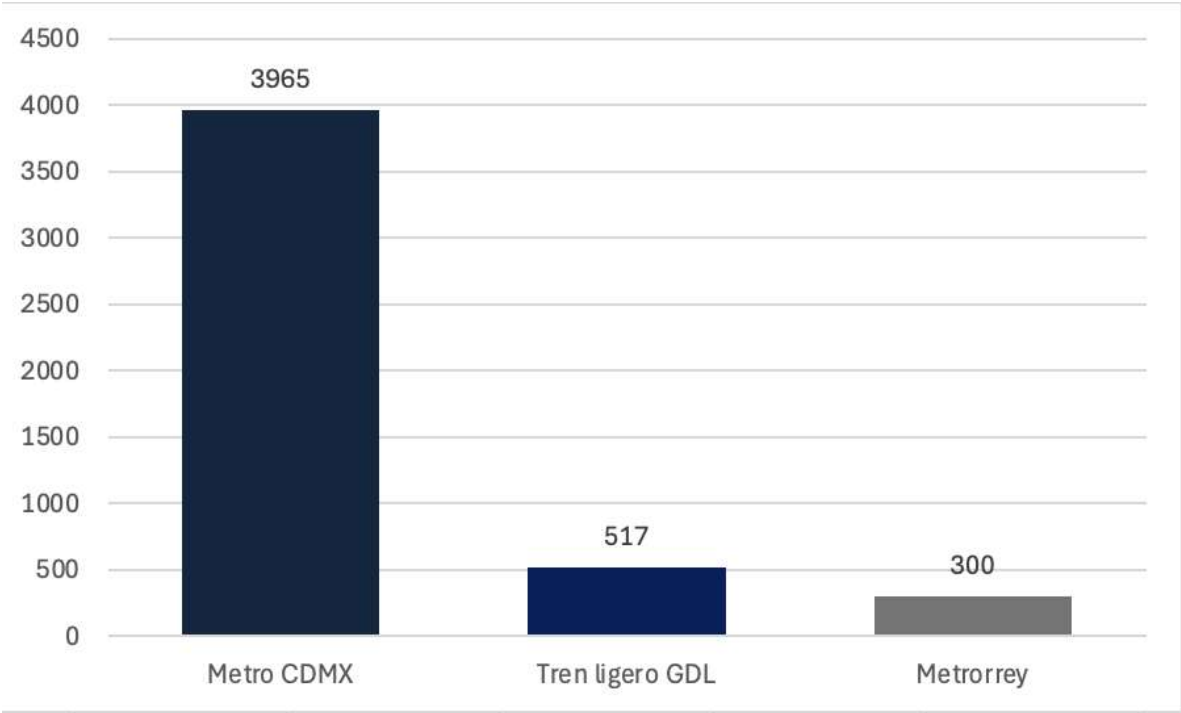
Es importante notar que en los últimos años el sistema de la Ciudad de México ha reportado una menor cantidad de vehículos sobre todo durante el periodo 2021-2022 esto puede deberse a las reparaciones y cambios en la infraestructura producto de los fenómenos anteriormente mencionados, de igual manera a partir de 2021 hasta el año 2023 el sistema de Metrorrey tuvo un incremento importante en su flota, sin embargo, los últimos meses de 2024 este sistema tuvo una reducción importante de la cantidad de trenes reportados. Mientras que en el caso del Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara existió un crecimiento un tanto constante en de la cantidad de unidades operativas el cual fue exacerbado por la introducción de la línea 3 en el año de 2020, cambió que se vio reflejado en su totalidad en las métricas de 2021.

Existen ciertas características del servicio de transporte público que inciden en el nivel general de su calidad. Estas características pueden verse como medidas internas de desempeño, sin embargo, también pueden ser consideradas como insumos que inciden en la confiabilidad y por ende en el nivel de demanda que presenten los sistemas (Molinero y Sánchez, 1998).

Un ejemplo de las características anteriormente mencionadas es la frecuencia normativa con la que los propios sistemas deciden operar, lo cual incide en la cantidad de viajes por día que se realizan, es por ello por lo que en esta investigación se le considera como uno de los insumos de operación de los sistemas que se están analizando, decisión que se justificará con mayor claridad en los siguientes apartados. En la siguiente figura se puede observar la comparativa de viajes diarios en promedio que realizan cada una de las líneas de los sistemas estudiados.

Figura 2.9

Número de viajes diarios programados en total de los sistemas de transporte público ferroviario urbano analizados con referencia a 2024



Nota: los datos fueron calculados a partir del intervalo de paso (tiempo que transcurre entre la salida de una unidad y la siguiente) y los horarios de servicio, las cifras fueron redondeadas para una mejor interpretación.

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por medio de la Plataforma Nacional de Transparencia de Sistema de Transporte Colectivo Metro (2025b); Sistema de Tren Eléctrico Urbano (2025b) y Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey (2025c)

A partir de la figura 2.9 se puede observar que el sistema que más viajes realiza al día es el Metro de la Ciudad de México, seguido por el sistema de tren ligero de Guadalajara y por último el sistema Metrorrey. Esta última observación resulta valiosa pues como se mencionó con anterioridad los sistemas de Guadalajara y Monterrey operan con insumos relativamente similares lo que implica que el primero mantiene una intensidad de uso mayor retratando –en términos operativos- que se tiene una mayor fluidez en su sistema, en apartados posteriores se analizará con mayor profundidad la intensidad operativa de forma desagregada por líneas.

Capítulo 3

Marco teórico y metodológico

3.1 Introducción

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos de esta investigación, en primer lugar, se hace una revisión del concepto de productividad, en seguida, se hace una retrospectiva histórica sobre los principales antecedentes teóricos de la eficiencia. En un siguiente apartado se realizan las precisiones teóricas-metodológicas de la eficiencia técnica, asignativa y económica. La segunda mitad del capítulo se encuentra enfocada en la descripción y fundamentación de la metodología empleada en esta investigación, la cual es el Análisis Envolvente de Datos y, por último, se mencionan sus principales ventajas y desventajas.

3.2 Productividad, eficiencia y eficacia

Para fines de esta investigación resulta ampliamente pertinente distinguir los conceptos de productividad, eficiencia y eficacia, los cuales, en el habla cotidiana, son empleados de manera indistinta, pero al realizar un estudio de las políticas públicas con una base de carácter técnico en la administración y gestión, como el que se está elaborando, es importante distinguir con precisión cada uno de estos elementos, ya que de ello depende la evaluación adecuada del desempeño de los sistemas productivos.

Prokopenko (1992) señala que la productividad es una herramienta importante en el área económica, la cual resulta de la relación de los insumos y productos generados por un sistema productivo. Añade, además, que es imperante considerar el tiempo en el que se generan los

productos, así como su calidad, distinguiendo que la productividad no se refiere a la intensidad del trabajo, sino que requiere de un uso eficiente e inteligente de los recursos.

Koontz *et al.* (2012) señala que, bajo tiempos de producción y calidad constantes, la productividad puede mejorar en tres escenarios posibles: el primero siendo el incremento en la cantidad de productos generados; el segundo, al disminuir la cantidad de insumos empleados y manteniendo constante la cantidad de productos generados y; el tercero, una combinación de los anteriores, es decir, aumentando la cantidad de productos generados con un menor consumo de insumos.

A partir de lo anterior, Koontz *et al.* (2012), señala que para que un sistema productivo sea eficaz debe ser eficiente y efectivo, por su parte, Idehlu *et al.* (2024) señalan que la efectividad se resume en el cumplimiento de los objetivos de un sistema productivo, sin embargo, Drucker (2006) señala que la efectividad se vincula con la toma de decisiones inteligente por parte de los administradores, siendo uno de ellos el uso adecuado de los recursos para favorecer al sistema productivo y sus objetivos. De tal forma que Idehlu *et al.* (2024) propone los siguientes casos en los que un sistema productivo se puede encontrar:

- Existe eficiencia y eficacia.
- Existe eficiencia, pero no efectividad.
- Existe efectividad, pero no eficiencia.
- No existe eficiencia ni efectividad.

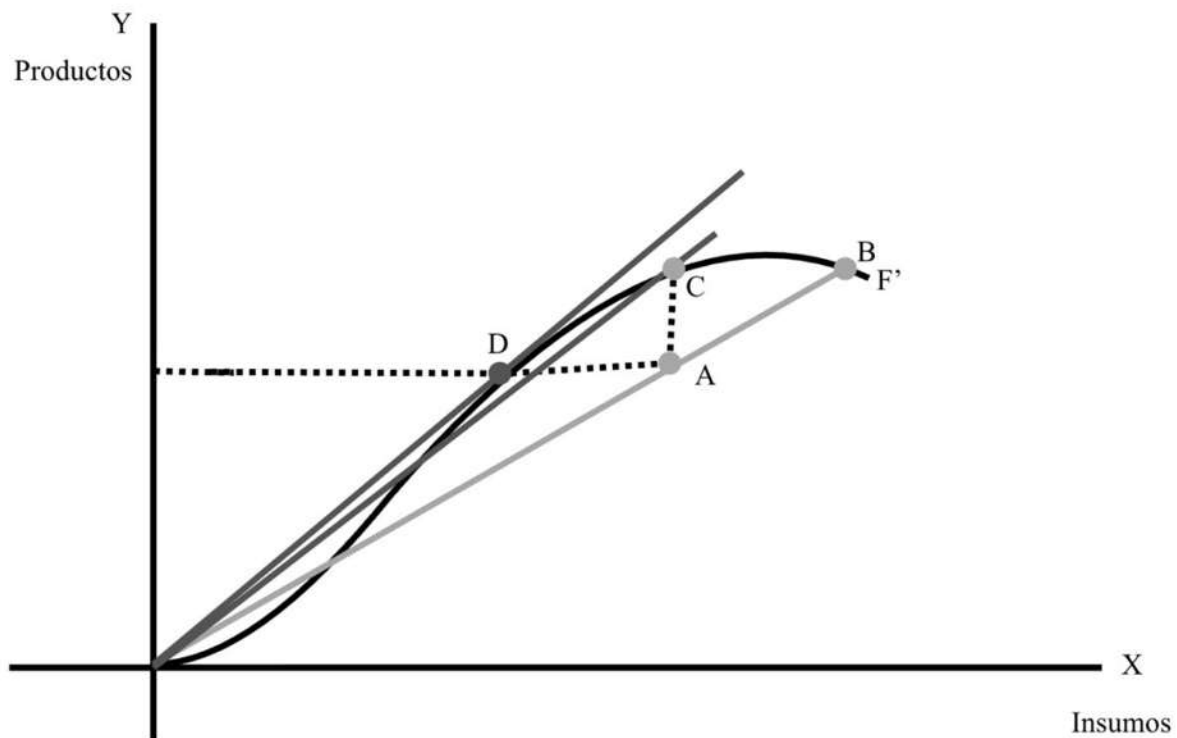
De forma general, la eficiencia puede ser definida como la medida en la que se alcanzan los objetivos de una iniciativa (o sistema productivo) con los costos mínimos, es decir, reduciendo el desperdicio de los recursos y alcanzando cabalmente los objetivos planteados (Mokate, 2001). Sin embargo, hasta este punto, la eficiencia y productividad son conceptos que se pueden confundir.

Lovell (1992) señala que mientras la eficiencia y productividad son usados de forma intercambiable, existen elementos que las hacen diferir. Navarro (2005) parte de la idea central de que la productividad es un elemento más general a la eficiencia, pero que esta última se debe comprender en su particularidad. En este sentido, Lovell (1992) indica que al considerar un solo

insumo y producto se puede medir la productividad de manera sencilla como el radio de producto / insumo. No obstante, esta situación es difícil de observar dentro del análisis empírico, Navarro (2005), por lo que se debe encontrar una manera sensible y adecuada de medir la combinación económicamente adecuada de múltiples insumos y productos, con la finalidad de reducir al radio de dos escalares. Lo anterior, revela la necesidad de conceptualizar la eficiencia de forma particular y precisa, Lovell (1992). Por lo cual, se muestra la figura 3.1:

Figura 3.1

Representación de la productividad y eficiencia



Fuente: elaboración propia con base en Giménez (2001) y Coelli *et al.* (2005)

De acuerdo con Navarro (2005) y Coelli *et al.* (2005), como se observa en la figura 3.1, se parte de un conjunto de producción factible, el cual representa la combinación de todos los insumos y productos que son eficientes, este conjunto se forma a partir de todos los puntos sobre la frontera de producción (F'). Se considera que la pendiente de cualquier punto en el plano a partir del origen representa una medición de productividad Y/X (producto / insumo).

Tomando como referencia el punto ineficiente A, si se traslada al punto B, este logra eficiencia, pero conserva la misma productividad al tener la misma pendiente. Mientras que, si al incrementar sus productos manteniendo sus insumos constantes alcanza el punto C, se convierte en eficiente, pero además incrementa su pendiente, lo que se traduce en una mayor productividad. No obstante, si reduce sus insumos manteniendo sus productos constantes, puede alcanzar el punto D, donde, además, la pendiente a partir del origen es tangente a la función de producción, logrando así el punto de productividad máxima, ya que la productividad sería menor en cualquier otro punto.

Lo anterior evidencia que hay decisiones que pueden alcanzar la eficiencia sin incrementar la productividad, de tal manera que se distinguen ambos conceptos. En resumen, mientras que la eficiencia está vinculada con el producto efectivo, la productividad lo está con el resultado. La eficiencia es un componente de la productividad, por lo que deben estudiarse de forma separada y se requiere analizar el proceso productivo desde un enfoque dinámico. En consecuencia, es importante puntualizar que cuando la intención es analizar el uso adecuado de los recursos de distintos sistemas productivos, la medición de la eficiencia resulta ser más adecuada (Navarro, 2005).

3.3 Nociones teórico-conceptuales de la eficiencia y sus tipos

El concepto de eficiencia mantiene una dimensión específica de la racionalidad, empleada en el control de las situaciones cambiantes alineándolas con una perspectiva de la realidad. Su uso cobró importancia a partir de los siglos XIX y XX a medida que se fue expandiendo el fenómeno de la industrialización, ya que se buscaba una interacción entre el mundo material y social a partir un control y manipulación racional, prospectiva y planeada en el manejo de los recursos. En este sentido, este concepto ha ido teniendo una mayor relevancia actual sobre la reducción de desechos (o emisiones) y su uso óptimo, lo que refuerza su dimensión económica y ambiental (Alexander, 2009).

En sentido amplio, la eficiencia puede definirse como el factor vinculado a los costos de producción a partir de la cantidad de los productos obtenidos, de modo, que un sistema productivo

es eficiente en tanto consigue el cumplimiento de sus objetivos (eficacia) empleado sus recursos con el mínimo costo (Intervención General de la Administración del Estado [IGAE], 2007). Por otra parte, se puede considerar la eficiencia como un indicador que contempla múltiples dimensiones, se parte de la idea de que tiene como objetivo evaluar si los recursos de un sistema productivo se transforman en bienes o servicios, sin embargo, se puede enfocar bajo la línea económica con respecto a los recursos, considerando su tipo, cantidad, costos, o posible sustitución, pero también se puede enfocar a los procedimientos involucrados en el proceso productivo o a los servicios obtenidos (Torres, 1991).

García (2002) señala que otra forma de distinguir los distintos enfoques de la eficiencia, desde su contexto productivo, radica en la categorización con respecto a los costos, cuando una unidad productiva tiene como intención minimizarlos, o por el lado contrario, en sus beneficios, cuando pretende maximizarlo.

Más allá de un concepto abstracto dentro de la literatura económica, la medición y aplicación empírica de la eficiencia presentaron un desafío teórico-metodológico, el cual fue desarrollado en distintas etapas. Los principales autores que se recuperan sobre la evolución de este concepto son Koopmans (1951), Debreu (1951) y, posteriormente, el trabajo de Farrell (1957). A continuación, se hace una síntesis de los aportes de cada uno de estos trabajos que terminaron por definir el marco teórico y metodológico de la medición de la eficiencia.

De acuerdo con Sarmiento y Castellanos (2008), los orígenes de los estudios y reflexiones teóricas enfocadas en la asignación óptima de los recursos se remontan a los trabajos de Francis Ysidoro Edgeworth en 1881 y de Wilfredo Pareto en 1909. Pareto constituyó uno de los principales aportes a la teoría económica en este sentido (Navarro, 2005), cuya contribución, de acuerdo con Varian (2010), puede resumirse de la siguiente manera:

- El punto de asignación óptima de los recursos sucede cuando:
 - No hay manera de mejorar la situación de las personas involucradas.
 - No hay manera de mejorar la situación de un individuo sin empeorar la situación de los demás.

- Se han producido todas las ganancias posibles en el intercambio.
- No hay tratos mutuamente ventajosos por hacer.

Posteriormente, el trabajo de Koopmans (1951) presentó los primeros esfuerzos en la definición y medición de la eficiencia técnica partiendo del trabajo de Pareto (1909). A partir de esto, Koopmans (1951) definió la eficiencia técnica como un vector factible de insumo / producto, donde es tecnológicamente imposible incrementar cualquier producto sin disminuir la producción de otro (Ruggiero, 2000).

Por su parte, Debreu (1951) partió de la búsqueda de una evaluación matemática de la pérdida de peso muerto, la cual asocia con una situación subóptima en el sentido de Pareto. Toma como base el sistema de precios asociado con el establecimiento de la situación óptima para el que hasta ese momento no existía una metodología para su cálculo. Para ello, emplea una medida llamada coeficiente de utilización de los recursos, el cual define como “la unidad menos la máxima reducción equiproporcional en todos los insumos, consistente con el mantenimiento en la producción de todos los productos” (García, 2002, p.11).

La contribución de (Farrell, 1957) resulta la de mayor importancia dentro del estudio de la eficiencia productiva, ya que logra hacer una propuesta empírica en su medición. Consigue generar el puente entre la teoría económica con respecto al que se conoce como comportamiento eficiente dadas las diferentes funciones de producción, costos y beneficios. Una de las ideas centrales de Farrell (1957) resulta en considerar como referencia las unidades económicas de objeto de estudio con mejor desempeño y con ello calcular los niveles de eficiencia de las demás, lo cual conlleva a tener una medición de la eficiencia de carácter relativo (López-González *et al.*, 2016).

En síntesis, el trabajo de Farrell (1957) determina una eficiencia relativa mas no absoluta y que la medición de esta es el resultado de la desviación de un sistema productivo con respecto a otros considerados eficientes. De igual manera, Farrell (1957) categoriza tres tipos de eficiencias productivas: técnica, asignativa y económica, esta última se entiende como la combinación de las primeras dos (Arzubi y Berbel, 2002). Las cuales se definirán con mayor profundidad en el apartado siguiente.

3.3.1 Eficiencia técnica

Para hacer posible una definición de la eficiencia técnica resulta imprescindible remontarse al trabajo de Koopmans (1951), en el cual, como se mencionó con anterioridad, define la eficiencia como aquella que se tiene cuando un sistema productivo no puede producir otro producto sin producir menos de otro o sin utilizar más de otros factores. Por lo tanto, se puede decir que este tipo de eficiencia, en un primer momento, no tiene un enfoque económico, pues se basa en el proceso productivo relacionado con el aprovechamiento físico de los insumos con los que cuenta (García, 2002).

Posteriormente, con el aporte de Debreu (1951) y con la consolidación a partir del trabajo de Farrell (1957) es posible definir a la eficiencia técnica como una diferencia de la unidad y un cociente que captura la reducción de manera proporcional en todos los insumos, que hace posible que se produzcan la totalidad de productos, o bien, como la unidad más el máximo incremento proporcional posible en la totalidad de los productos y con el mismo uso de insumos (Navarro, 2005). En este sentido, cuando el cociente de un sistema económico “X” es igual que la unidad o $X = 1$ existe un caso de eficiencia técnica, y si $X < 1$ se habla de un caso de ineficiencia técnica (Morán, 2018).

El aspecto tecnológico resulta importante cuando se estudia la eficiencia técnica, debido a que se le puede considerar como la obtención de la máxima producción factible, considerando como dada la tecnología con la que cuenta el sistema productivo a partir de determinados insumos (Alé, 1990). En este sentido, la eficiencia técnica puede interpretarse como una evaluación de la capacidad de gestión de los sistemas productivos, ya que, por otro lado, el avance tecnológico se origina a partir de la implementación de nuevas prácticas productivas, (López-González *et al.*, 2016).

Por otra parte, Sarmiento y Castellanos (2008) señala que existe un caso de eficiencia técnica cuando un sistema productivo posee la capacidad de generar un máximo producto posible a partir de su determinado nivel de insumos. En el caso contrario, la ineficiencia técnica aparece cuando existe una pérdida en las ganancias debido a la utilización de una combinación inadecuada de insumos en un proceso productivo adecuado o de otra manera, la situación en la que se emplea una

mayor cantidad de insumos de los necesarios para generar una cantidad determinada de productos, lo que se puede definir como la medición de la subutilización proporcional de los insumos.

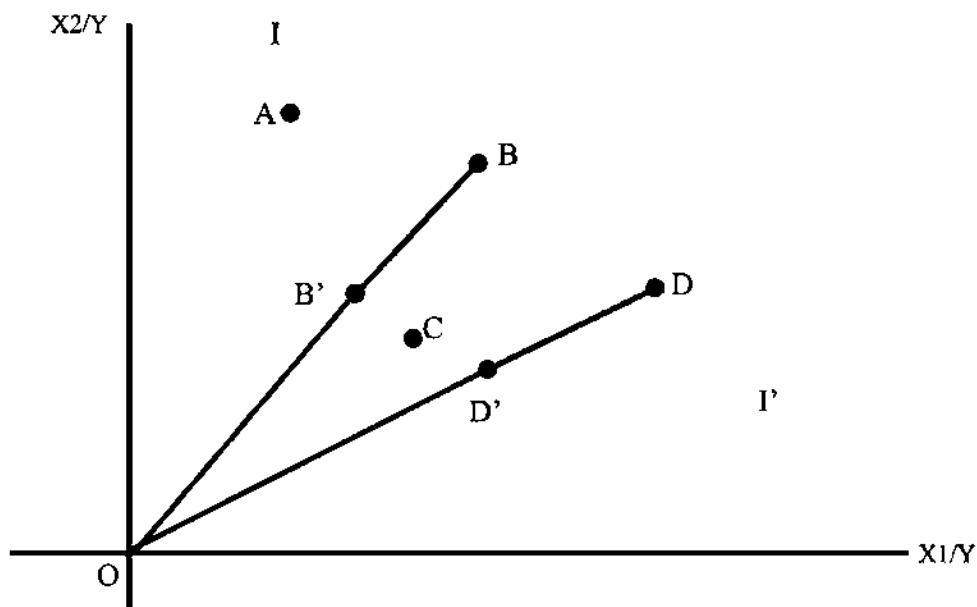
En este sentido, tomando en cuenta lo anterior, Trillo del Pozo (2002) indica que la eficiencia técnica de un sistema productivo se encuentra relacionado con el uso del capital o del trabajo (recursos humanos), al generar una diversidad de bienes o servicios. En otras palabras, consiste en la utilización de las unidades físicas de la producción, lo cual, en consecuencia, deja fuera el análisis de los costos o el precio de los factores productivos, así como su contraparte, los ingresos generados. Este autor argumenta que un caso de ineficiencia técnica se produce cuando existe la posibilidad de incrementar los productos generados a partir de un nivel dado de recursos, o si bien, aún existe un margen en el que se puede disminuir el uso de los recursos para alcanzar cierto nivel de producción.

A partir del trabajo de Farrell (1957) se puede conceptualizar, de forma muy general, la eficiencia técnica, como los insumos requeridos dada la mejor práctica de las Unidades de Toma de Decisión (DMUs por sus siglas en inglés) en la producción de los productos observados relativo a las cantidades de insumos observadas, manteniendo las ratios de insumos observados; OQ/OP (Førsund y Sarafoglou, 2002).

De tal modo que Coll y Blasco (2006) presentan una explicación a partir de la siguiente figura:

Figura 3.2

Representación gráfica de la eficiencia técnica



Fuente: elaboración propia con base en Coll y Blasco (2006)

Coll y Blasco (2006) explica que se parte de cuatro sistemas productivos que se representan en los puntos: “A, B, C y D”, los cuales generan un único producto “Y” y utiliza dos factores o insumos “ $X1/Y$ y $X2/Y$ ”. Retomando la figura 3.1, cada punto localizado en el plano representa un cierto plan de gestión observado de cada uno de los sistemas productivos representados. La curva isocuanta se encuentra formada por el conjunto de unidades eficientes, de modo que los sistemas que se encuentren por encima de esta tendrían un caso de ineficiencia técnica.

En el mismo sentido, al analizar la figura 3.2, es posible observar que los sistemas productivos localizados en los puntos “B y D” representan casos de ineficiencia técnica, ya que es posible que ambos sistemas conserven la misma generación de productos, pero con una menor cantidad de insumos empleados. Esta ineficiencia se encuentra representada por las líneas $B'B$ y $D'D$. En el caso opuesto, los sistemas productivos ubicados en los puntos “A y C” presentan un caso de eficiencia técnica pues se encuentran sobre la isocuanta de combinación eficiente.

Siguiendo con la explicación de Coll y Blasco (2006), el coeficiente de eficiencia, por lo tanto, puede matematizarse como la distancia entre el origen y el punto sobre la isocuanta eficiente sobre la distancia entre el origen y el punto observado para determinado sistema productivo. De tal modo que para el punto D su coeficiente de eficiencia se puede expresar de la siguiente manera:

Ecuación 3.1

$$\text{Eficiencia Técnica de D} = ET_D = \frac{OD'}{OD}$$

Por lo tanto, el coeficiente de eficiencia técnica se representa únicamente por valores comprendidos entre 1 y 0. De manera que al alcanzar a 1 se establece que el sistema productivo es totalmente eficiente y mientras si es más cercano a 0, se puede decir que existe una mayor distancia entre el sistema productivo y la curva isocuanta de eficiencia, lo que representa una mayor ineficiencia técnica.

De igual manera, resulta importante señalar que la eficiencia técnica puede considerar más casos (los cuales serán descritos con mayor profundidad en apartados posteriores), uno de ellos es considerar un único insumo y producto, o múltiples insumos y solo un producto, caso contrario, tomar un único insumo y múltiples productos, o finalmente, una variedad de insumos y una variedad de productos (García, 2002).

Otra de las variaciones que existen al momento de definir la eficiencia técnica es saber si se encuentra enfocada en los productos o los insumos. De acuerdo con Debreu (1951), este primero tiene como objetivo medir la maximización de productos generados dado cierto nivel de insumos, y el segundo tiene como objetivo medir la minimización de los insumos requeridos dado cierto alcance en la generación de productos (García, 2002).

En este sentido, se puede tener la siguiente distinción de mediciones en la eficiencia técnica (Pérez, 2025):

Ecuación 3.2

$$ETA_I = \text{Eficiencia técnica hacia los insumos}$$

Continuando con la distinción de los diferentes enfoques en la medición de la eficiencia, Navarro (2005) señala que producto de las reflexiones elaboradas por Førsund *et al.* (1980) es posible distinguir la eficiencia técnica de la eficiencia asignativa y de la eficiencia de escala. Por otro lado, a partir del trabajo de Banker *et al.* (1984) la eficiencia técnica puede ser medida a partir de distintos rendimientos, lo cual permite evaluar la eficiencia técnica pura, la eficiencia técnica global y la eficiencia técnica a escala, las cuales serán desarrolladas con mayor profundidad en los apartados siguientes.

3.3.2 Eficiencia asignativa

Como se mencionó con anterioridad, la eficiencia técnica no considera los costos y los ingresos de la producción. Por lo cual, una parte importante del trabajo de Farrell (1957) se enfocó en la conceptualización de la eficiencia cuando los costos e ingresos resultan relevantes para los sistemas productivos. En este sentido, Ganga *et al.* (2016) señalan que la eficiencia asignativa, a la que también se le conoce como eficiencia de precio, es la eficiencia alcanzada por los sistemas productivos en el caso en el que existe una combinación de insumos que dado el costo mínimo logra un producto determinado considerando precios establecidos previamente. De forma complementaria, Sarmiento y Castellanos (2008) argumentan que la eficiencia asignativa se produce cuando existe un flujo de los insumos a partir de los cuales un sistema productivo genera bienes y servicios partiendo de las preferencias de los consumidores, quienes consideran su máximo beneficio, o bien, el punto en donde el costo marginal es igual al precio del bien o servicio, en consecuencia, la ineficiencia asignativa se produce cuando existe cualquier desviación del conjunto óptimo de insumos.

A partir de lo anterior y atendiendo a las teorías microeconómicas de asignación de los recursos que hacen Parkin y Loría (2010), la eficiencia en este contexto, o por lo tanto la eficiencia asignativa, tiene las siguientes características:

- Al considerar un equilibrio competitivo, la asignación eficiente de los recursos se produce cuando el costo marginal social iguala al beneficio marginal social.
- La transacción maximiza en conjunto el excedente del productor y el excedente del comprador.
- Los casos de subproducción o de sobreproducción pueden generar situaciones de ineficiencia.

En este sentido, Silva Portela *et al.* (2003) y Pérez (2025) argumentan que, cuando la intención es medir la eficiencia asignativa, se deben considerar insumos y productos específicos en la forma de costos e ingresos, respectivamente, información que debe ser controlable y conocida, lo cual bajo modelos no orientados permitiría conocer la reducción de insumos (costos) y el incremento de los productos (ingresos), lo que en este caso en particular se traduce en un incremento en las ganancias.

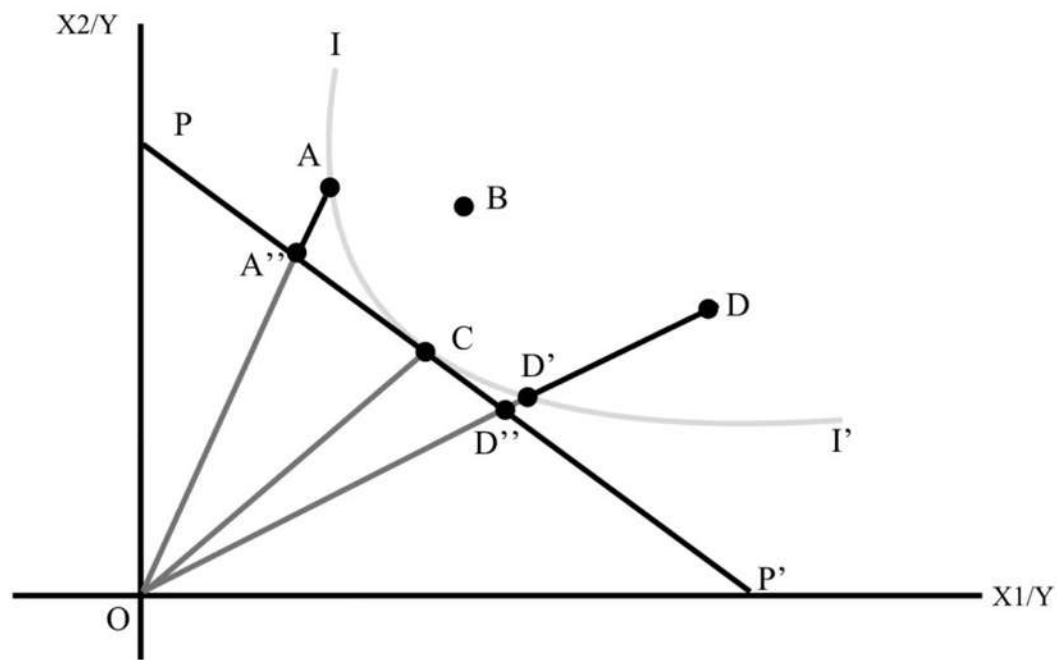
De tal modo que, para alcanzar la eficiencia asignativa, no basta con producir sobre la curva isocuanta de la frontera posibilidades de producción, sino debe también hacerlo empleando cierta combinación de recursos, la cual posibilite al sistema productivo procesarlos bajo los costos mínimos considerando determinado nivel de producción (Bosch *et al.*, 1999 como se cita en Navarro, 2005).

En hilo con lo anterior, Førsund y Sarafoglou (2002), argumentan que la eficiencia asignativa se alcanza cuando se consideran los costos de producción observados de un producto con respecto al precio observado de los insumos, asumiendo eficiencia técnica, relativo a la minimización de costos al punto en frontera de producción “Q”; OR / OQ. En adición, Coelli *et al.* (2005) señalan que se deben considerar los costos mínimos dados los precios de los recursos prevalecientes.

Retomando entonces que la eficiencia asignativa requiere de la eficiencia técnica (representada en la figura 3.2), pero añadiendo otras consideraciones, Coll y Blasco (2006) proponen su representación a partir de la figura 3.3:

Figura 3.3

Representación gráfica de la eficiencia asignativa



Fuente: elaboración propia con base en Coll y Blasco (2006)

Como se puede observar en la figura 3.3, la curva PP' representa la curva de isocostos, su pendiente se encuentra dada a partir de la relación entre los precios de los insumos $X1$ y $X2$. Se puede identificar que, al colocarse sobre la isocuanta de la frontera de posibilidades de producción, los puntos “A y C” son técnicamente eficientes, no obstante, únicamente el sistema productivo representado por el punto “C” se localiza sobre la curva de isocostos, lo que muestra un caso de eficiencia asignativa, situación contraria al sistema productivo en “A”, el cual, para salir de su estado de ineficiencia asignativa, requeriría reducir sus costos de producción totales hasta ubicarse en el punto “A”” (Coll y Blasco, 2006).

Así, para cuantificar la eficiencia asignativa, de acuerdo con (Coll y Blasco, 2006), debe considerarse la relación entre la longitud que existe entre el origen y el punto estimado en la curva de eficiencia de isocostos, y la longitud entre el origen y el punto proyectado en la curva isocuanta

de la frontera de posibilidades de producción, por lo que, tomando en consideración el punto “A”, su coeficiente de eficiencia asignativa se matematizaría de la siguiente manera:

Ecuación 3.4

$$Eficiencia\ asignativa = EA_A = \frac{OA''}{OA}$$

En la fórmula anteriormente descrita por la ecuación 3.4, los valores que se pueden obtener tienen un rango de 0 a 1, de modo que, si este coeficiente no es igual a 1, se indica que existe ineficiencia asignativa (Coll y Blasco, 2006). Es importante notar que para que un sistema productivo presente un caso de eficiencia asignativa, las referencias de precios requieren de la eficiencia en sentido económico, lo que significa que deben enfocarse en alcanzar el punto óptimo en sentido de Pareto (Navarro, 2005). No hay que olvidar que la combinación de la eficiencia técnica y la eficiencia asignativa permite concebir la eficiencia económica (Coelli *et al.*, 2005).

3.4 Métodos de medición de la eficiencia

Cuando existe la intención de medir de forma cuantitativa el desempeño de un sistema productivo desde la eficiencia, es importante la selección de la metodología adecuada (Delfín y Navarro, 2014). Una forma de categorizar los distintos métodos de estimación de la eficiencia es a través de los métodos de frontera y no frontera, así como los métodos paramétricos y no paramétricos (Coelli *et al.*, 2005). De forma más específica, se propone otra categorización que son los modelos estocásticos y los modelos determinísticos, otras distinciones señalan metodologías estadísticas (Bogetoft y Otto, 2011; Coll y Blasco, 2006).

3.4.1 Métodos de no frontera

Una de las características principales de los métodos de no frontera es que no se necesita establecer una formulación explícita de la construcción de la curva conformada por los escenarios posibles de producción. Por lo que emplear este tipo de métodos no es tan complejo en la evaluación empírica de las unidades productivas a partir del rendimiento y desempeño. Si bien, permiten tener un primer acercamiento al entendimiento de eficiencia de los sistemas productivos, por lo general

se considera que omiten elementos relevantes de las características organizacionales, así como elementos externos, lo que en consecuencia no hace posible comprender su eficiencia global (Arias, 2009).

Navarro (2005) sostiene que los métodos de no frontera pueden clasificarse en dos grupos, por un lado, los que se encuentran sustentados por números-índices y, por otro, aquellos enfocados en estimar la productividad de los factores considerando precios normalizados. Los primeros permiten la determinación del comportamiento del desempeño de la eficiencia de un sistema productivo en una temporalidad determinada; mientras que los segundos poseen la gran ventaja de permitir la verificación de hipótesis, para lo cual es necesario establecer una forma funcional específica, al mismo tiempo tienen la desventaja de no mostrar la eficiencia sobre la base de las unidades productivas consideradas.

En sentido a lo anterior, Arias (2009) propone el agrupamiento de los métodos de no frontera, partiendo por los índices o ratios financieros, estos se basan en la relación de dos magnitudes y de forma interna permiten hacer comparaciones en distintos momentos o de manera externa (evaluando diversos sistemas productivos) en un momento dado. Este tipo de métodos han sido relacionados con la productividad parcial pues miden la proporción de un solo factor de la producción con respecto a un solo producto. También se señalan los métodos de Índice de Productividad Global (IPG) y la Función de Producción Promedio.

3.4.2 Métodos de frontera

Como se ha venido analizando, retomando el trabajo de Farrell, se concibieron distintos enfoques de los métodos de frontera, como fronteras paramétricas determinísticas, fronteras estocásticas y fronteras estadísticas (Navarro, 2005). Esta perspectiva metodológica, considerando sus desprendimientos, ha sido considerada como confiable debido a que establece una función de producción que está relacionada con los productos generados y los factores de producción empleados. Estos métodos definen el límite de las posibilidades de producción, por lo tanto, la medición de la eficiencia se origina a partir de la medición de la distancia que existe entre el

sistema productivo y la frontera de eficiencia. Es importante recordar que uno de los pilares de estos métodos radica en el principio de optimización en sentido Pareto (Arévalo *et al.*, 2022).

Métodos de fronteras no paramétricas

Los modelos de frontera no paramétricos permiten determinar la curva de eficiencia resolviendo un problema de programación lineal basándose en la información empírica disponible, los programas determinan la medición de la eficiencia sin establecer relaciones a priori entre los insumos y productos del sistema (Radlińska, 2023). Esta medición se realiza sin establecer una especificación funcional y sin considerar la presencia de ruido estadístico. Para lo cual emplean técnicas de optimización lineal que es el resultado del cálculo de una envoltura convexa, considerando los puntos que ubican al espacio de producción tomando en consideración insumos y costos. (Ayaviri y Quispe, 2011; López-González *et al.*, 2016)

Los principales métodos con estas características son el Análisis Envolvente de Datos (DEA por sus siglas en inglés) y el *Free Disposal Hull* (FDH) (Delfín y Navarro, 2014). Es importante, señalar que la idea central de estos métodos parte de considerar que, dado que un sistema productivo logra un cierto desempeño con un determinado nivel de recursos, todos los demás sistemas tienen la capacidad de asemejarse o de adoptar estrategias que le permitan alcanzar un comportamiento similar (Ayaviri y Quispe, 2011).

Una de las grandes ventajas de estas metodologías radica en su flexibilidad, debido a que es posible aplicarla en diversos sectores productivos considerando sus características particulares, como lo es el caso de esta investigación en el transporte ferroviario urbano. Sin embargo, las principales consideraciones que se deben tener al momento de aplicar alguno de estos métodos se encuentran relacionadas con la exclusión inconsciente de términos de error que lleven consigo información de variables no consideradas, además, es posible que algún sistema con comportamiento atípico condicione las mediciones de eficiencia de forma errónea debido a la característica de referencias y comparación con otros sistemas que tienen un comportamiento más constante entre ellas (Delfín y Navarro, 2014).

Métodos de fronteras paramétricas determinísticas

A pesar de que, de los aportes de Farrell, los enfoques no paramétricos de frontera han sido los mayormente aceptados por los investigadores, este autor realizó de igual forma la propuesta de métodos de frontera paramétrica. Farrell propuso computar una envolvente convexa a partir de las ratios de insumos y productos observados. La selección de las formas funcionales consistió en la forma de Cobb-Douglas, sin embargo, fue consciente de las implicaciones no deseadas de imponer una forma funcional específica y restrictiva, pero, por otro lado, señaló la ventaja de expresar la frontera en una forma matemáticamente simple, así como la incorporación de rendimientos no constantes a escala (Førsund *et al.*, 1980).

Uno de los modelos más reconocidos, siguiendo esta perspectiva, son los mínimos cuadrados corregidos (COLS por sus siglas en inglés) el cual corresponde a la estimación de una regresión ordinaria (Bogetoft y Otto, 2011). En síntesis, los métodos de frontera paramétrica asumen la función de producción microeconómica. Se utilizan modelos econométricos para determinar los parámetros de la función de producción, es decir, los parámetros que definen la relación funcional entre los insumos y productos obtenidos con la finalidad de determinar los parámetros de la curva de eficiencia. Las fallas operativas son definidas como la desviación entre los valores observados y los valores determinados por la función teórica de eficiencia (considerando el error aleatorio) (Radlińska, 2023).

Las principales desventajas de estos métodos giran en torno a la sensibilidad de los sistemas productivos con valores atípicos, de igual forma, la selección de la forma funcional puede no ser siempre la más adecuada, y esto, además, puede influir en la cantidad de sistemas productivos que pueden ser considerados como eficientes (Navarro, 2005).

Métodos de fronteras estadísticas determinísticas

Los métodos de frontera estadística determinista surgen a partir de los métodos de frontera paramétrica determinística. Afriat (1972) propone un parámetro de distribución de los desvíos (como errores de medición) y con ello establecer una hipótesis a partir de una forma única de

métodos estadísticos y de estimación a través de la máxima verosimilitud, pero conservando la frontera determinística. A partir de este aporte, al establecer distribuciones se hace posible realizar hipótesis y con ello ampliar el análisis (Førsund *et al.*, 1980; Navarro, 2005).

Los inconvenientes de estos métodos surgieron en torno al condicionamiento del rango de las variables dependientes en la estimación de los parámetros, ya que no se mantenían las condiciones asintóticas y consistentes de las estimaciones máxima verosimilizada, para lo cual una posible corrección puede surgir considerando distribuciones *Gamma*, las cuales a su vez tienen la desventaja de que dependen de una gran cantidad de observaciones (Navarro, 2005).

Métodos de fronteras estocásticas

Las últimas dos agrupaciones de los métodos de frontera asumen fronteras determinísticas, en las cuales se considera un comportamiento similar en las fronteras de producción, costos y ganancias, por lo que todas las variaciones se atribuyen a condiciones de ineficiencia, las cuales son relativas a las fronteras compartidas. No obstante, estas condiciones raramente se observan en el análisis empírico, ya que situaciones externas como fallas en la maquinaria, mal clima o colapsos en la cadena de suministros, así como condiciones endógenas son ignoradas (Førsund *et al.*, 1980). Estas críticas son el punto de partida de la formulación de las fronteras estocásticas.

En esencia, las fronteras estocásticas parten de que el término de error se compone de dos elementos, un componente simétrico que permite variaciones aleatorias atribuibles a errores de medición, ruido estadístico y colapsos aleatorios fuera de control del sistema productivo y otro componente que captura los efectos de la ineficiencia relativa a la frontera estocástica. Esta frontera se construye considerando una distribución simétrica que permita capturar los efectos aleatorios de los errores de medición y los factores exógenos, además de un componente unilateral que incluye la ineficiencia técnica relativa a la función estocástica (Førsund *et al.*, 1980).

Los métodos que han seguido estas particularidades son el Análisis de Frontera Estocástica (SFA por sus siglas en inglés), el cual, como se mencionó con anterioridad, reconoce que las variaciones de los sistemas productivos pueden deberse a errores de medición o factores externos. De igual

manera, en esta categoría entra el método del Análisis Envolvente de Datos Estocástico (SDEA por sus siglas inglés), que combina la estructura flexible del DEA tradicional con la posibilidad de que ciertas variaciones pueden deberse al ruido estadístico y solo requiere que la mayoría de los puntos sean envueltos (Bogetoft y Otto, 2011).

Finalmente, los principales beneficios de estos métodos se encuentran en la rigurosidad con la que se tratan los problemas de medición y especificación, no obstante, los principales inconvenientes radican en que se requiere de una mayor cantidad de datos y se hace más complejo la determinación de nivel de ineficiencia de un sistema productivo, así mismo, no es posible distinguir la ineficiencia técnica de la asignativa (Navarro, 2005).

3.5 El Análisis Envolvente de Datos (DEA)

El Análisis Envolvente de Datos es un acercamiento orientado hacia los datos para la evaluación del desempeño de un conjunto de entidades de referencia, llamadas Unidades de Toma de Decisión (DMUs por sus siglas en inglés). Las cuales convierten múltiples insumos en múltiples productos. La definición de las DMUs es genérica y flexible. En su artículo introductorio a esta metodología, Charnes *et al.* (1978) lo definieron como un modelo de programación matemática aplicada a un conjunto de datos observados que provee una nueva forma de obtener relaciones empíricas estimadas como la frontera de producción o las superficies eficientes de las posibilidades de producción (Cooper *et al.*, 2011a).

En sentido a lo anterior, Delfín y Navarro (2014), señalan que la metodología DEA es una forma radial de medir la eficiencia, de tal modo que se espera que a partir de un consumo determinado de insumos se incrementen los productos generados y, con ello, se incremente la productividad sin requerir insumos adicionales. O, por otro lado, si con la reducción en el consumo de insumos se puede alcanzar la misma cantidad de productos generados. Esta metodología, como se mencionó anteriormente, forma parte de las fronteras no paramétricas, de igual manera, la eficiencia medida es de carácter relativo ya que se considera que una DMU es eficiente a partir de la evidencia de que no existe otra DMU del conjunto de referencia que muestre que alguno de sus insumos o productos no pueden mejorarse sin afectar a otros insumos o productos (Cooper *et al.*, 2011a).

De acuerdo con una manera de diferenciar los modelos DEA puede ser de la siguiente manera:

- En la forma en la que miden la eficiencia:
 - Radiales.
 - No radiales.
- En la forma en la que el modelo está orientado:
 - Orientado a los insumos.
 - Orientado a los productos.
 - No orientados.
- En la selección de rendimientos a escala:
 - Rendimientos Constantes a Escala (CRS por sus siglas en inglés).
 - Rendimientos Variables a Escala (VRS por sus siglas en inglés).

De acuerdo con esta clasificación, es importante precisar que en apartados anteriores se ejemplificó la eficiencia técnica de Farrell considerando un modelo hacia los insumos, no obstante, es relevante hacer la distinción con respecto a los modelos orientados hacia los productos. Coelli *et al.* (2005) señala que la intención de los modelos orientados hacia los insumos es conocer la eficiencia respecto a la disminución de insumos que permitan mantener el mismo nivel de productos generados, por otro lado, los modelos orientados hacia los productos buscan con los mismos insumos maximizar el nivel de producto generado. Un primer argumento sugiere que la selección de la orientación depende en qué medida se tenga control sobre los insumos o productos, sin embargo, la selección carece de importancia cuando se consideran rendimientos constantes a escala (CRS) ya que no existe variación, no obstante, si existe diferencia en la medición cuando rendimientos variables a escala (VRS) son aplicados.

Por otra parte, Cook *et al.* (2014), van más allá del criterio del control, ellos sostienen que la elección de la orientación debe estar principalmente fundamentada en los objetivos y las características de la investigación, de modo que exista una consistencia lógica entre la naturaleza de los insumos y productos, y los objetivos de los sistemas productivos.

A continuación, se muestran las características y formulaciones de los modelos radiales considerando la selección de rendimientos. Se parte del modelo de Charnes *et al.* (1978), con sus respectivas categorizaciones, de acuerdo con su orientación y, en seguida se hace lo mismo para el modelo de Banker *et al.* (1984).

3.5.1 El modelo DEA de Charnes, Cooper y Rhodes (CCR)

Como se ha mencionado, Charnes *et al.* (1978) continúan con el trabajo de Farrell en torno a la medición de la eficiencia y la determinación de la frontera eficiente, para lo cual desarrollan un modelo de programación lineal que considera rendimientos a escala (CRS) partiendo de las siguientes consideraciones (Cooper *et al.*, 2011a; Navarro, 2005):

Se considera para cada DMU un insumo y producto virtual a partir de ponderaciones “ v_i ” y “ u_r ” (hasta el momento desconocidas):

$$\text{Ecuación 3.4} \quad \text{Insumo virtual} = v_1x_{1o} + \dots + v_mx_{mo}$$

$$\text{Ecuación 3.5} \quad \text{Producto virtual} = u_1y_{1o} + \dots + u_sy_{so}$$

En seguida, se trata de determinar las ponderaciones empleando programación lineal como para maximizar la ratio:

$$\text{Ecuación 3.6} \quad \frac{\text{Producto virtual}}{\text{Insumo virtual}}$$

Las ponderaciones generalmente varían entre una DMU y otra, por lo tanto, las ponderaciones en DEA son derivados de los datos en lugar de ser determinadas a priori. A cada DMU se le asigna el mejor conjunto de ponderaciones con valores que pueden variar entre el resto (Cooper *et al.*, 2007).

Lo anterior permite sintetizar las características del modelo de Charnes *et al.* (1978). En primer lugar, se hace la reducción de múltiples insumos y múltiples productos a la de sólo un insumo virtual y un único producto virtual, por lo tanto, la medida de eficiencia proviene del cociente del

producto virtual sobre el insumo virtual, finalmente, al concebir un modelo de programación lineal, el objetivo es maximizar el cociente (función objetivo) sujeto a la restricción (normalizadora), donde los cocientes de todas las DMU sean iguales o menores que la unidad. (Canay, 2003 como se cita en Navarro, 2005).

Los modelos DEA pueden ser matematizados de formas distintas las cuales pueden ser fraccionales, multiplicadoras o envolventes (Delfín y Navarro, 2014). A continuación, se muestran las distintas versiones de expresión matemática de los modelos CCR.

Modelo fraccionario CCR con orientación a los insumos

A partir del trabajo de Charnes *et al.* (1978) se recupera la forma fraccional del modelo CCR con rendimientos constantes a escala y con orientación hacia los insumos (Coll y Blasco, 2006):

Ecuación 3.7

$$Max_{u,v} \quad h_o = \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}}$$

Sujeto a:

$$\frac{\sum_{r=1}^s u_r y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

Donde:

$$u_r v_i \geq 0$$

Se plantean **n** unidades (**j = 1, 2,...,n**), quienes emplean los mismos insumos (en cantidades distintas) para generar productos iguales (pero en distintos niveles). **X_{ij}** (**X_{ij} ≥ 0**) por otra parte, expresa los niveles de insumos **i** (**i =1, 2,..., m**) empleados por la j-ésima unidad. **X_{i0}** expresa el nivel de insumo utilizado por la unidad medida, **Unidad₀**, **Y_{rj}** (**Y_{rj} ≥ 0**) expresa los niveles observados de productos, **r** (**r =1,2,...,s**) generados por la j-ésima unidad. **Y_{r0}** expresa la cantidad de producto generado por la unidad que es evaluada, Unidad₀. **u_r** (**r= 1,2,...,s**) y **v_i** (**i=1,2,...,m**) están en el lugar de las ponderaciones de los productos e insumos de manera respecta a la explicación de Coll y Blasco (2006) el modelo descrito a partir de la ecuación 3.7, tiene como objetivo alcanzar el conjunto de ponderaciones óptimas “v_i” y “u_r” que lleven a la eficiencia

relativa a su punto máximo, h_0 , de la unidad₀ la cual consiste en el cociente entre la suma ponderada de productos y la suma ponderada de insumos, considerando que se encuentra sujeto a la restricción de que no puede haber ninguna DMU con una mayor puntuación de eficiencia que la unidad empleando las mismas ponderaciones, por las características anteriormente descritas, las ponderaciones serán distintas entre las DMU.

Modelo multiplicativo CCR con orientación a los insumos y con orientación a los productos

Siguiendo el modelo fraccional propuesto por Charnes *et al.* (1978) selecciona con base en la transformación lineal la solución (μ, δ) con la finalidad de establecer $\sum_{i=1}^m \delta_i x_{i0} = 1$ (Coll y Blasco, 2006). Por lo tanto, el modelo multiplicativo queda de la siguiente forma:

Ecuación 3.8

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\mu, \delta} \quad w_0 &= \sum_{r=1}^s \mu_r y_{r0} \\ \text{Sujeto a:} \\ \sum_{i=1}^m \delta_i x_{i0} &= 1 \\ \sum_{i=1}^s \mu_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m \delta_i x_{ij} &\leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \\ \mu_r, \delta_i &\geq \varepsilon \end{aligned}$$

De acuerdo con Coll y Blasco (2006), debe puntualizarse que se ha efectuado una normalización de restricción a partir de la normalización del insumo virtual. Así mismo Boussofiane *et al.* (1991) argumentan que el problema de programación lineal resuelto determina los niveles óptimos de las ponderaciones “ μ_r y δ_i ”, lo cual se representa “ μ_r^* y δ_i^* ”, que, en su forma matricial, de acuerdo con Coll y Blasco (2006) se expresa:

Ecuación 3.8

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\mu, \delta} \quad W_0 &= \mu^T y_0 \\ \text{Sujeto a:} \\ \delta^T X_0 &= 1 \\ \mu^T Y - \delta^T X &\leq 0 \end{aligned}$$

$$\mu^T, \delta^T \geq I\epsilon$$

En donde Y expresa una matriz de productos de orden (s x n), y₀ es el vector de productos de la DMU evaluada, X es una matriz de insumos de orden (m x n), x₀ significa el vector de insumos de la DMU evaluada y μ representa al vector (s x 1) de las ponderaciones de los productos, y δ es el vector (m x n) (Coll y Blasco, 2006).

Por lo que la expresión multiplicadora matricial para un modelo orientado a los productos sería de la siguiente forma:

Ecuación 3.10

$$\text{Min}_{\mu, \delta} W_0 = \delta^T x_0$$

Sujeto a:

$$\mu^T y_0 = 1$$

$$\delta^T X - \mu^T Y \geq 0$$

$$\mu^T, \delta^T \geq I\epsilon$$

Retomando las ecuaciones 3.4 y 3.5 de los insumos y productos virtuales, así como recordando los ajustes de corrección de la programación lineal que sustituye a “u_r” y “v_i” con “μ_r y δ_i”, se pueden ahora matematizar y significar las ponderaciones de la siguiente forma:

Ecuación 3.11

$$\left(\sum_{i=1}^m \delta_i x_{i0} \right) = \text{Insumos virtuales}$$

Ecuación 3.12

$$\left(\sum_{r=1}^s \mu_r Y_{r0} \right) = \text{Productos virtuales}$$

La ecuación 3.11 representa la suma ponderada de los insumos, mientras que la ecuación 3.12 se refiere a la sumatoria del producto ponderado. Estos valores permiten conocer el nivel de importancia que una DMU otorga a ciertos insumos y productos con el fin de alcanzar la máxima puntuación de eficiencia, a partir de lo anterior, permite calcular la contribución de cada insumo

en relación con el total, así como la contribución de cada producto con relación a la puntuación de eficiencia (Boussofiane *et al.*, 1991; Coll y Blasco, 2006).

Modelo envolvente CCR con orientación a los insumos y con orientación a los productos

Los problemas primales (programa lineal original) pueden ser solucionados con un programa lineal asociado o también llamado programa dual. La forma más común de la aplicación de los modelos DEA es a través de los modelos envolventes (Coll y Blasco, 2006). En el caso del CCR envolvente y considerando ambas partes su matematización parte de la siguiente forma:

Ecuación 3.13

$$\text{Min}_{\theta, \lambda} Z_0 = \theta$$

Sujeto a:

$$Y\lambda \geq y_0$$

$$\theta x_0 \geq X\lambda$$

$$\lambda \geq 0$$

En donde λ representa al vector (n x 1) de ponderaciones o densidades, $\lambda = \begin{matrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{matrix}$ de tal modo que λ_1 es la intensidad de la DMU_j, por otro lado, θ representa el nivel de eficiencia (en este caso técnica) de la DMU₀ (Coll y Blasco, 2006).

Los modelos duales permiten capturar las ineficiencias no radiales (si es que existen) a través de las holguras (*slacks*) las cuales son excesos no proporcionales (Navarro, 2005). Si se toma en consideración la eficiencia Pareto – koopmans la eficiencia sólo se logra si $\theta^* = 1$ y si las holguras en insumos y productos son iguales a 0 (Cooper *et al.*, 2007). Por lo tanto, la forma envolvente con el procedimiento dual del modelo CCR se puede matematizar de la siguiente manera:

Ecuación 3.14

$$\text{Min}_{\theta, \lambda, s^+, s^-} Z_0 = \theta - \varepsilon(Is^+ + Is^-)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned}\lambda Y &= y_0 + s^+ \\ \lambda X &= \theta x_0 - s^- \\ \lambda, s^+, s^- &\geq 0\end{aligned}$$

Donde s^+ expresa la variable de holgura del producto, s^- la variable de holgura del insumo, Is^+ es el vector de holguras del producto y Is^- es el vector de holguras del insumo (Coll y Blasco, 2006). A partir de la ecuación 3.14 se puede matematizar el modelo CCR en su forma envolvente con orientación a los productos:

Ecuación 3.15

$$\begin{aligned}Max_{\varphi, \lambda, s^+, s^-} Z_0 &= \varphi + \varepsilon(Is^+ + Is^-) \\ \text{Sujeto a:} \\ \varphi y_0 - \lambda Y + s^+ &= 0 \\ \lambda X + s^- &= x_0 \\ \lambda, s^+, s^- &\geq 0\end{aligned}$$

Donde φ representa la proporción en la que los productos podrían ser expandidos (Navarro, 2005).

3.5.2 El modelo DEA de Banker, Charnes y Cooper (BCC)

Los modelos anteriormente revisados, como el de Charnes *et al.* (1978), parten de considerar Rendimientos Constantes a Escala (CRS), sin embargo, la propuesta posterior de Banker *et al.* (1984), permite considerar Rendimientos Variables a Escala (VRS) los cuales se componen por tres tipos de rendimientos: constantes, decrecientes y crecientes, cuyas características se definirán más adelante (Cooper *et al.*, 2007). De acuerdo con Navarro (2005) esta propuesta permite la comparación de cualquier DMU solo con aquellas de igual tamaño añadiendo ciertas restricciones al modelo original de Charnes *et al.* (1978).

Modelo multiplicativo matricial BCC con orientación a los insumos y con orientación a los productos.

De acuerdo con Coll y Blasco (2006), el modelo BCC parte matemáticamente de la relación establecida previamente para los modelos CRS, con la diferencia de que en estos casos se añade un elemento constante k_0 que considerando rendimientos variables a escala (VRS) se establece con valor 0. Este elemento representa el valor del intercepto (k) en el eje de los productos de la proyección de cada cara que conforma la curva isocuanta de la eficiencia de tal manera que se obtiene lo siguiente de acuerdo con Norman y Stoker (1991):

$$\text{Ecuación 3.16} \quad \frac{\text{Suma ponderada de productos} + \text{constante } k}{\text{Suma ponderada de insumos}}$$

En este sentido, de acuerdo con Coll y Blasco (2006), la forma multiplicativa y matricial de los modelos BCC, aplicando la restricción correspondiente y con orientación a los insumos, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 3.17} \quad & \text{Max}_{(\mu, \delta, k)} W_0 = \mu^T y_o + K_0 \\ & \text{Sujeto a:} \\ & \delta^T X_0 = 1 \\ & \mu^T Y + k_0 \leq \delta^T X \\ & \mu^T, \delta^T \geq I\varepsilon \\ & K_0 \text{ no restringida} \end{aligned}$$

A partir de la ecuación 3.17, de acuerdo con Charnes *et al.* (1994), se puede establecer que el objetivo de este modelo es identificar el hiperplano que minimice la distancia en el eje de las abscisas desde el hiperplano de la DMU₀ permaneciendo por encima del resto de DMUs. En adición, con este modelo se puede estimar los valores óptimos de las ponderaciones de insumos y productos y con ello en qué proporción contribuye la relación insumo / producto (Coll y Blasco, 2006).

A partir de la ecuación 3.17 se puede obtener la ecuación 3.18 la cual representa el modelo matemático DEA BCC multiplicativo matricial orientado a los productos (Coll y Blasco, 2006):

Ecuación 3.18

$$\text{Min}_{\mu, v, k} W_0 = \delta^T x_0 - k'_0$$

Sujeto a:

$$\mu^T y_0 = 1$$

$$\delta^T X - k'_0 \geq \mu^T Y$$

$$\mu^T, \delta^T \geq I\varepsilon$$

K'_0 no restringida

De forma inversa al modelo orientado hacia los insumos expresado en la ecuación 3.17, el elemento K'_0 se encuentra relacionado con los insumos, por lo tanto, se debe considerar con signo inverso y transformando en este sentido las interpretaciones que se le dan con respecto a esta constante en el modelo orientado a los insumos (Coll y Blasco, 2006).

Modelo envolvente BCC con orientación a los insumos y con orientación a los productos.

Para el modelo envolvente se requiere añadir una restricción al modelo de programación lineal que considera rendimientos constantes a escala (CRS) la cual está relacionada con el elemento k que se expresa de la siguiente forma (Coll y Blasco, 2006; Cooper *et al.*, 2007):

Ecuación 3.19

$$\sum_1 \lambda = 1$$

Por lo tanto, de acuerdo con Coll y Blasco (2006), la forma matemática del modelo DEA BCC en su forma envolvente, orientada a los insumos y en dos etapas, considerando los elementos de holguras, se presenta de la siguiente forma:

Ecuación 3.20

$$\text{Min}_{\theta, \lambda, s^+, s^-} Z_0 = \theta - \varepsilon(Is^+ + Is^-)$$

Sujeto a:

$$\lambda Y = y_0 + s^+$$

$$\begin{aligned}\lambda X &= \theta x_0 - s^- \\ \rightarrow \lambda &= 1 \\ \lambda, s^+, s^- &\geq 0\end{aligned}$$

Partiendo de la ecuación 3.15, el modelo orientado a los productos en su forma envolvente se puede matematizar de la siguiente forma:

Ecuación 3.21

$$\begin{aligned}Max_{\varphi, \lambda, s^+, s^-} Z_0 &= \varphi + \varepsilon(Is^+ + Is^-) \\ \text{Sujeto a:} \\ \lambda Y &= \varphi y_0 + s^+ \\ \lambda X &= x_0 - s^- \\ \rightarrow \lambda &= 1 \\ \lambda, s^+, s^- &\geq 0\end{aligned}$$

De acuerdo con la definición de eficiencia de Pareto – Koopmans, las DMUs tendrán la calidad de eficiencia en los modelos orientados a los insumos si y solo si cumplen con la condición $\theta^* = 1$ y si las holguras son nulas lo que significa: $s^{+*} = 0$ y $s^{-*} = 0$, por otro lado, en el modelo orientado a los productos, la condición de eficiencia es si y solo si $\varphi^* = 1$ y se cumple la misma condición de holguras que las descritas anteriormente (Coll y Blasco, 2006).

3.5.3 Eficiencia técnica global, eficiencia técnica pura, eficiencia a escala y rendimientos a escala

Al emplear el modelo CCR, el cual considera rendimientos constantes a escala (CRS) pueden confundirse problemas de ineficiencia técnica con problemas de ineficiencia de escala, por lo cual, se pueden aplicar modelos BCC con rendimientos variables a escala (VRS) con la finalidad de distinguir este tipo de ineficiencias con los problemas de ineficiencia técnica pura, lo cual se puede representar de la siguiente forma (Coelli *et al.*, 2005):

Ecuación 3.22

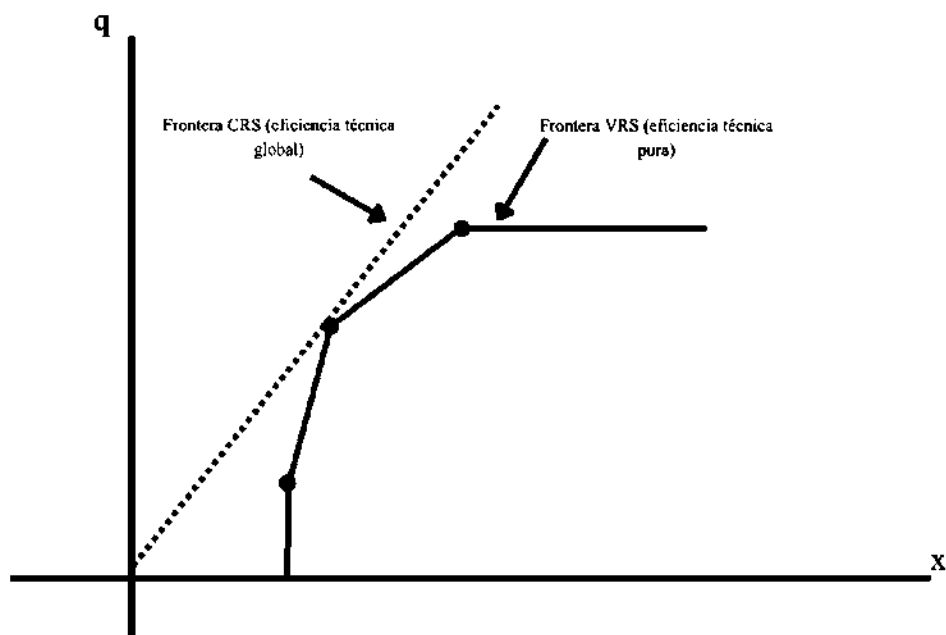
$$Eficiencia\ técnica\ global_{CRS} =$$

$$(Eficiencia\ técnica\ pura_{VRS})(Eficiencia\ a\ escala)$$

Con base en lo anterior se puede hacer la distinción gráfica de la frontera de Eficiencia Técnica Global (ETG) con la frontera de eficiencia técnica pura (ETP):

Figura 3.4

Representación gráfica de la frontera con CRS y la frontera con VRS.



Fuente: Elaboración propia con base en Coelli *et al.* (2005).

En este sentido, Thanassoulis (2001), explica que la eficiencia de escala mide el impacto del tamaño de escala en la productividad de una DMU la cual se define de la siguiente manera:

Ecuación 3.23

$$Eficiencia\ de\ escala\ (EE) = \frac{ETG}{ETP}$$

Por definición, la eficiencia a escala mide la divergencia entre el índice de eficiencia de una DMU bajo rendimientos constantes a escala (CRS) y bajo rendimientos variables a escala (VRS), respectivamente (Thanassoulis, 2001).

Con la consideración de VRS su ponderación se obtiene cuando se controla el tamaño de escala de una DMU. Si la eficiencia técnica pura y la eficiencia técnica global son iguales, entonces la eficiencia de escala es igual a 1, lo cual indica que el tamaño de operación de escala de la DMU no tiene un impacto en su productividad. Caso contrario, si la eficiencia técnica global es menor a la eficiencia técnica pura, entonces la eficiencia de escala será de 1 lo que quiere decir que el tamaño de escala de la DMU impacta en su productividad, de modo que, a mayor diferencia entre las puntuaciones de la eficiencia técnica pura y de la eficiencia técnica global menor es el valor de la eficiencia a escala y por ende es más adverso el impacto del tamaño de escala en la productividad (Thanassoulis, 2001).

Rendimientos a escala

A las consecuencias de transformar la escala de operación de un sistema productivo, es decir, de un incremento de todos sus insumos o factores productivos, se le conoce como rendimientos a escala. Existen tres escenarios distintos: rendimientos constantes, crecientes o decrecientes a escala (Varian, 2010):

- Rendimientos constantes a escala: Un incremento (t) en todos los insumos se traduce en un incremento en la misma proporción en los productos generados (f).

$$\text{Ecuación 3.24} \quad f(tx_1, tx_2 \dots tx_n) = tf(x_1 x_2 \dots x_n)$$

- Rendimientos crecientes a escala: Un incremento en todos los insumos se traduce en un incremento de mayor proporción en los productos generados.

$$\text{Ecuación 3.25} \quad f(tx_1, tx_2 \dots tx_n) > tf(x_1 x_2 \dots x_n)$$

- Rendimientos decrecientes a escala: Un incremento en todos los insumos se traduce en un incremento de menor proporción en los productos generados.

$$\text{Ecuación 3.26} \quad f(tx_1, tx_2 \dots tx_n) < tf(x_1 x_2 \dots x_n)$$

3.5.4 Los modelos de referencias o *Benchmarking*

Los modelos DEA son un claro ejemplo del uso en la investigación de operaciones de la práctica de *Benchmarking*. Esta práctica puede definirse como la evaluación y el análisis de procesos, productos o servicios con la finalidad de establecer una comparación, la cual permita determinar un punto de referencia que posibilite guiar las estrategias de una DMU. La intención es aprender de la experiencia de otras DMU para mejorar el desempeño de las DMU evaluadas, a partir de las siguientes consideraciones: 1) la identificación de las mejores prácticas debe hacerse tomando en cuenta las circunstancias y características de las DMU evaluadas, 2) las mejores prácticas deben retratar comportamientos eficientes, 3) los objetivos establecidos deben ser alcanzables y en medida de lo posible tener el control sobre el esfuerzo necesario para alcanzarlos (Guevel *et al.*, 2025).

En sentido a lo anterior, Zhu (2009) argumenta que la metodología DEA usa el *benchmarking* debido a que la frontera identificada puede ser considerada como un referente empírico de excelencia. Una vez se ha establecido una frontera, tal vez se requiera comparar un conjunto de nuevas DMU con respecto a esta. No obstante, cuando una DMU tiene un desempeño mejor que el establecido por esta frontera, una nueva es generada por el DEA, por lo que no se tiene la misma frontera de referencia para el nuevo conjunto de DMUs.

De acuerdo con Navarro (2005) el *benchmarking* se puede especificar en tres dimensiones:

- Interna: Cuando la evaluación se realiza dentro de un mismo sistema productivo.
- Competitiva: Se presenta en los casos en los que sistemas productivos competidores trabajan en conjunto para la mejora de uno o más sistemas, por lo cual, no es común encontrarla en la aplicación empírica.
- Interindustrial: Comparaciones de desempeño considerando industrias distintas

En síntesis, Navarro (2005) señala que hacer análisis *benchmarking* implica la adaptación de las mejores prácticas en lugar de simplemente replicarlas, con lo cual, es imperativo conocer un

proceso que permita determinar lo que se puede adaptar del proceso donante. De esta manera, en el *benchmarking* se requiere de una cultura o postura cuya finalidad sea la de lograr un mejor desempeño y superar las dimensiones del comportamiento del proceso donante.

3.5.6 Análisis de holguras o *slacks*

El problema de las holguras o *slacks*, en cualquier solución óptima en los modelos radiales DEA, surge porque se busca expandir todos los productos o contraer todos los insumos en la misma proporción (Ray, 2004). En este sentido, un sistema productivo puede tener una puntuación de eficiencia de 1, lo que se traduce como totalmente eficiente, y aun con ello ser ineficiente en el sentido Pareto-Koopmans (Bogetoft y Otto, 2011).

Ray (2004) argumenta que existen casos de ineficiencia Pareto -Koopmans, los cuales responden a las siguientes características: una combinación insumo-producto (x^0 , y^0) no logra la eficiencia Pareto-Koopmans si se viola alguno de los siguientes postulados de ineficiencia:

- Es posible incrementar al menos un producto en el conjunto y^0 sin reducir cualquier otro producto o evitando incrementar cualquier insumo en el conjunto x^0 .
- Es posible reducir al menos un insumo en el conjunto x^0 sin incrementar cualquier otro insumo o evitando reducir cualquier producto del conjunto.

Con lo anterior, Bogetoft y Otto (2011) indican que, en este caso de ineficiencia, algunos insumos podrían ser reducidos y algunos productos podrían ser expandidos sin afectar los insumos consumidos o los productos generados. En resumen, Zamora (2018) señala que aun cuando se ha efectuado la reducción radial de una DMU colocándose en el punto eficiente proyectado, existe la posibilidad de disminuir los insumos consumidos, lo cual, como se señaló con anterioridad, retrata que esa DMU no se encuentra en un punto óptimo debido a que se puede, con una menor cantidad de insumos, generar la misma cantidad de producto o caso contrario, generar mayor nivel de producto empleando la misma cantidad de insumos, por lo que, a la distancia entre el punto óptimo y el punto de eficiencia radial proyectado se le conoce como holgura.

En relación con lo previamente descrito, Bogetoft y Otto (2011), indica que hay dos posibles soluciones para el problema de las holguras en DEA, la primera es penalizar dicha holgura usando lo que se conoce como un factor de penalización infinitesimal, el cual, sin impactar los resultados numéricos (debido a que es lo suficientemente pequeño), puede identificar la posibilidad de holgura (debido a que es lo suficientemente grande). Por otra parte, la segunda solución consiste en resolver el problema dual empleando insumos y productos estrictamente positivos.

De acuerdo con Bogetoft y Otto (2011) para penalizar las holguras se puede considerar la reformulación de Farrell (1957) para los modelos de eficiencia orientados a los insumos:

Ecuación 3.27

$$\text{Min}_{E,\lambda} E - \delta \sum_{i=1}^m Z_i^- - \delta \sum_{j=1}^n Z_j^+$$

Sujeto a:

$$Ex_i^o + Z_i^- = \sum_{k=1}^K \lambda^k x_i^k, \quad i = 1, \dots, m$$

$$y_i^o - Z_i^+ = \sum_{k=1}^K \lambda^k y_i^k, \quad i = 1, \dots, n$$

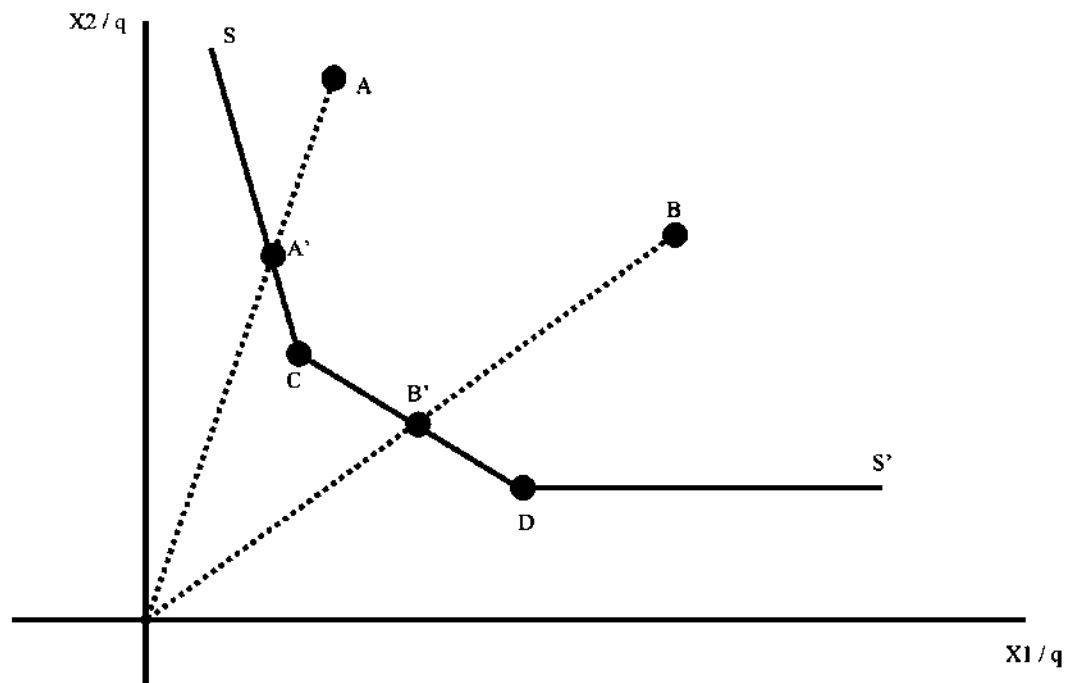
$$\lambda \in \Lambda^k(\gamma), \quad Z^- \geq 0, \quad Z^+ \geq 0, \quad E \leq 1$$

En la ecuación 3.27 se han incorporado las variables de holguras de insumos Z_i^- , $i = 1, \dots, m$ la cual mide cualquier exceso de recursos en Ex^o como se compara la DMU de referencia. Del mismo modo, se ha añadido la variable de holgura del producto Z_j^+ , $j = 1, \dots, n$ que se encarga de la medición de cualquier exceso del producto en la DMU de referencia comparada con la DMU_o. Por último, se ingresan $d > 0$ así como $d = 0$, con el primero se añade una penalización de holguras, y luego el programa original (Bogetoft y Otto, 2011).

De forma complementaria, Coelli *et al.* (2005), propone una forma más visual de comprender las holguras, se parte de la figura 3.5:

Figura 3.5

Medición de la eficiencia y holguras en los insumos



Fuente: elaboración propia con base en Coelli *et al.* (2005)

De acuerdo con la figura 3.5, los sistemas productivos “C y D” definen la frontera ya que son eficientes empleando determinada combinación de insumos, por lo tanto, los sistemas productivos “A y B” son ineficientes. Considerando únicamente la medición de eficiencia técnica de Farrell (1957) los sistemas productivos “A y B” podrían considerarse eficientes bajo la razón “ OA' / OA ” y “ OB' / OB ”, respectivamente. No obstante, valdría la pena preguntarse si el punto A' es realmente eficiente, debido a que es posible reducir la cantidad de consumo del insumo $X2$ (dada por la cantidad CA'), mientras se obtiene la misma cantidad de producto. En la literatura a esto se le conoce como holgura en los insumos (Coelli *et al.*, 2005).

3.5.7 Incorporación de productos no deseados

En sintonía con los nuevos paradigmas enfocados en la conservación ambiental y cuidado del medio ambiente, productos no deseados de actividades productivas y sociales como contaminantes

del aire y desechos peligrosos, han sido reconocidos como peligrosos e indeseables. En consecuencia, el desarrollo de nuevas tecnologías que minimicen su generación ha ganado reconocimiento en las diversas áreas de producción (Cooper *et al.*, 2007).

De acuerdo con Cooper *et al.* (2007) la metodología DEA se sustenta bajo el criterio de eficiencia en el que se busca la generación de más productos empleando un menor volumen de insumos, no obstante, al considerar productos no deseados, las tecnologías productivas que generen una mayor cantidad de productos y que al mismo tiempo reduzcan la generación de productos no deseados relativo al consumo de un menor volumen de insumos deben ser reconocidas como eficientes.

El carácter deseable de los productos, el cual es un dilema que aparece de forma constante en las aplicaciones empíricas del DEA, es determinado generalmente por el tomador de decisiones, debido a que tiene una dimensión subjetiva. De tal modo, que este tomador de decisiones elige de acuerdo con su conveniencia aquello que le es mejor producir en mayor medida y, en caso contrario con los productos no deseados (Zhou y Liu, 2015). En este sentido uno de los trabajos precursores en la medición de eficiencia considerando productos no deseados es Faere *et al.* (1989), el cual desarrolla una metodología no lineal para la medición de la eficiencia de fábricas de papel considerando el deshecho de químicos tóxicos como producto no deseado (Seiford y Zhu, 2002).

Zhou y Liu (2015) señalan que existen diversas formas de tratar o de incorporar los productos no deseados, las cuales se pueden agrupar en 2 conjuntos distintos. Los primeros realizan una transformación de los productos no deseados para incorporarlos a los modelos DEA clásicos, mientras los segundos no emplean transformaciones agregando y transformando ciertos elementos de programación lineal de los DEA clásicos.

Una de las transformaciones intuitivas es la traslación:

Ecuación 3.28

$$f(U) = -U + \beta$$

Uno de los grandes inconvenientes de esta transformación es que el valor de β puede afectar las ponderaciones y las clasificaciones en los modelos. Por lo tanto, otra de las clasificaciones ampliamente utilizada llamada aproximación de adición es la siguiente (Zhou y Liu, 2015):

Ecuación 3.29

$$f(U) = -U$$

La transformación descrita en la ecuación 3.29 permite que los productos no deseados sean tratados como productos deseables, no obstante, implica transformar los datos en su forma negativa, lo cual complejiza la medición de puntajes de eficiencia al tratar con datos negativos, ya que los modelos tradicionales funcionan bajo criterios de no-negatividad.

También se han propuesto transformaciones de carácter no lineal como los inversos multiplicativos el cual se muestra a continuación:

Ecuación 3.30

$$f(U) = \frac{1}{U}$$

Esta transformación es compleja metodológicamente, en este sentido, la elección de la transformación de productos indeseables depende en mayor medida de las características de cada caso de estudio (Zhou y Liu, 2015).

Partiendo de la clasificación antes mencionada, se puede decir que hay métodos indirectos para tratar los productos no deseados, en esta categoría entran las transformaciones anteriormente explicadas, pero también la posibilidad de simplemente ignorar los productos no deseados. En otra categoría entran las que se pueden llamar técnicas directas, las cuales integran a los modelos convencionales los productos no deseados, siendo una posibilidad tratar a los productos no deseados como insumos (Scheel, 2001; Sun *et al.*, 2025).

Otra de las posibilidades en las técnicas directas es aplicar restricciones y transformaciones a los modelos de eficiencia radial, mientras que considerando el supuesto de disponibilidad débil, se pueden integrar los productos no deseados a los modelos basados en las holguras (SBM por sus

siglas en inglés) y en los modelos de función de distancia direccional (DDF por. sus siglas en inglés) (Zhou y Liu, 2015).

En relación con la incorporación de productos no deseados a los modelos radiales tradicionales, se presenta la propuesta de Li *et al.* (2013), su aporte parte de considerar un modelo DEA en el cual se integran un insumo, un producto y un producto no deseado, representados en 3 vectores $x \in R^m$, $y^g \in R^{s_1}$, $y^b \in R^{s_2}$, respectivamente. Se definen las matrices X , Y^g , Y^b de la siguiente manera:

Ecuación 3.31

$$\begin{aligned} X &= [x_1, x_2, \dots, x_n] \in R^{m \times n} \\ Y^g &= [y_1^g, y_2^g, \dots, y_n^g] \in R^{s_1 \times n} \\ Y^b &= [y_1^b, y_2^b, \dots, y_n^b] \in R^{s_2 \times n} \end{aligned}$$

Se asume que $X > 0$, $Y^g > 0$, $Y^b > 0$. Por lo tanto, la frontera de posibilidad de producción (P) se define:

Ecuación 3.32

$$P = \{(x, y^g, y^b) | x \geq X\lambda, y^g \leq Y^g \lambda, y^b \geq Y^b \lambda, \lambda \geq 0\}$$

Donde λ es el vector de densidad y las tres desigualdades en la función de P representan que el respectivo nivel observado del insumo es mayor que el nivel de inversión de la frontera, los niveles observados de producto por debajo del nivel de producto en la frontera y el nivel observado excede el nivel mínimo eficiente. En este punto, el modelo DEA orientado al producto que incluye productos no deseados para evaluar a la DMU (x_0, y_0^g, y_0^b) bajo rendimientos constantes (CRS) sería (Li *et al.*, 2013):

Ecuación 3.33

$$\sigma^* = \max \sigma_0$$

Sujeto a:

$$\begin{pmatrix} x \\ y^g \\ y^b \end{pmatrix} \in T = \{(x, y^g, y^b) | x_0 \geq X\lambda, (1 + \sigma_0)y_0^g \leq Y^g \lambda, (1 - \sigma_0)y_0^b \geq Y^b \lambda, \lambda \geq 0\}$$

O bien, añadiendo la restricción $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ para considerar rendimientos variables a escala (VRS) el modelo quedaría:

Ecuación

$$\sigma^* = \max \sigma_0$$

3.34 Sujeto a:

$$\begin{aligned} & \begin{pmatrix} x \\ y^g \\ y^b \end{pmatrix} \in T = \\ & \left\{ (x, y^g, y^b) \left| x_0 \geq X\lambda, (1 + \sigma_0)y_0^g \leq y^g\lambda, (1 - \sigma_0)y_0^b \geq Y^b\lambda, \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \lambda \geq 0 \right| \right\} \end{aligned}$$

Al resolver los modelos tradicionales como en los que agregan productos no deseados se obtiene el índice de ineficiencia, por lo cual para transformarlo en un índice de eficiencia basta con hacer la siguiente operación (Seiford y Zhu, 2002):

Ecuación 3.35

$$\theta = \frac{1}{1 + \sigma}$$

Finalmente, Seiford y Zhu (2002) señalan que se pueden agrupar las técnicas de manejo de los productos no deseados en 5 posibilidades: la primera es simplemente ignorar los productos no deseados; la segunda es incluirlos en modelos no lineales; la tercera es tratar a los productos no deseados como productos y ajustar las mediciones de distancia para restringir la expansión de los productos; la cuarta es tratar a los productos no deseados como insumos, sin embargo, esta técnica no retrata el comportamiento productivo real de las DMUs; y por último, la quinta es aplicar una transformación monótona decreciente $\frac{1}{y^b}$ a los productos no deseados y usar variables adaptadas para los productos.

3.5.8 Ventajas y limitaciones del DEA

La totalidad de metodologías empleadas para la determinación de la eficiencia incluyendo el DEA tienen características que los colocan en una posición más ventajosa en algunas dimensiones a comparación de otros modelos, sin embargo, también aparecen ciertas limitaciones. Los modelos DEA suelen presentar mayores ventajas respecto a la dimensión técnica, las cuales los hacen más convenientes, debido a que representan una mejor alternativa a las limitaciones de otro tipo de métodos como los índices o incluso los métodos econométricos (Navarro, 2005). Se pueden sintetizar las principales ventajas y limitaciones de los modelos DEA de la siguiente manera:

Tabla 3.1

Ventajas y limitaciones de los modelos DEA

Ventajas	Limitaciones
• Permite emplear múltiples productos e insumos, de manera simultánea, hace también posible ingresar insumos de carácter discrecional, así como variables de entorno y la generalización del modelo para añadir perspectivas de personas conocedoras del tema. • Cada una de las DMU recibe una única puntuación de eficiencia relativa. • Gracias a la proyección de la frontera eficiente de cada DMU pueden identificarse áreas de mejora para cada una de ellas, permitiendo establecer un plan de ajuste con base en los insumos y productos objetivos.	• Considerando sólo el modelo radial, los resultados pueden no considerar ineficiencias en el sentido Pareto-Koopmans. • La cantidad de sistemas eficientes es sensible al número de productos e insumos considerados en el modelo de estimación. • Los resultados son altamente sensibles a la selección de variables, lo cual determina la presencia de observaciones drásticas que a su vez pueden llevar a lecturas no adecuadas que dependen más de la selección de variables que de una eficiencia inherente.

• No establece inferencias ni especificaciones estadísticas a priori, evitando cometer errores de especificación. • Es la metodología que permite obtener más información con base en los datos de entrada y salida. • Se requiere de poca información en las salidas como en las entradas. Pueden usarse indicadores como volumen de personal, horas / trabajadores, salario para representar el factor trabajo bajo la consideración de que se requiere que todas las DMUs lo hagan en las mismas unidades. • Es posible asumir rendimientos variables a escala, lo que permite determinar la eficiencia de escala, lo cual no es posible con otros métodos paramétricos. • No es difícil su comprensión, ya que únicamente requiere conocimiento de programación lineal y de los fundamentos teóricos sobre los que se sostiene.	• No ofrece una medición de eficiencia absoluta. • Cuestiones fuera de control o aleatorias pueden incidir en la medición de eficiencia, la cual es de carácter determinístico, sin embargo, no es posible considerarlas dentro del modelo. • Alta influencia del comportamiento de DMUs atípicas.
---	--

Fuente: elaboración propia con base en Coll y Blasco, (2006); Fuentes, (2003); Navarro, (2005); Trillo del Pozo, (2002)

3.6 La eficiencia técnica sostenible, una revisión conceptual

Para poder definir el término de eficiencia técnica sostenible es importante desagruparlo y aclarar cada uno de sus componentes. En primera instancia se establece en la Agenda 2030 de las Naciones Unidas (ONU, 2015) que el desarrollo sostenible o la sostenibilidad requiere de la integración de tres dimensiones: la económica, la social y la ambiental, las cuales son elementos clave para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En este sentido, de acuerdo con los aportes de Farrell (1957), la eficiencia productiva es un componente de la eficiencia económica, es decir, un elemento de la dimensión económica. En relación con lo anterior, la eficiencia técnica de Farrell (1957) se alcanza cuando se maximizan la cantidad de productos generados dado cierta cantidad de insumos, o bien se minimiza la cantidad de insumo consumido manteniendo el nivel de productos generados constante.

En congruencia con lo anterior, como se mencionó a partir de los trabajos de Faere *et al.* (1989); Seiford y Zhu (2002) y Cooper *et al.* (2007), nuevos paradigmas de investigación han surgido en torno a la medición de la eficiencia técnica, considerando externalidades negativas como las emisiones, la generación de residuos o la generación de desechos nocivos para la salud. No obstante, se requiere de una mayor especificación conceptual de la eficiencia técnica sostenible que vaya más allá de interpretaciones endebles.

Con la finalidad de alcanzar una mayor delimitación conceptual de la eficiencia técnica sostenible, se debe partir desde lo que en la práctica se han entendido como tal. En relación con lo anterior y enfocado al sector energético, Ortiz (2025) señala que una concepción frecuente ha sido la medición de la eficiencia considerando únicamente variables ambientales, no obstante, desde esta categorización no es posible alcanzar la eficiencia sostenible pues se requieren la incorporación de la dimensión económica y social.

Partiendo del punto anterior, Zaroni *et al.* (2025) sostienen que los estudios DEA que consideran la sustentabilidad existe aún una amplia variedad interpretativa que lleva a una amplia variabilidad metodológica en la selección de insumos y productos notando que en algunos se incorporan solo ciertas dimensiones. Así mismo, Łozowicka (2020) encontró que en los estudios que emplean la

metodología DEA existe poca profundidad y claridad en torno a la incorporación de las dimensiones de desarrollo sostenible. Los patrones encontrados muestran que diversos estudios implementan ciertas dimensiones del desarrollo sostenible como la económica o la ambiental, mientras que otros cubren de manera simultánea las tres dimensiones completas. No obstante, en esta aproximación tan amplia no es posible caracterizar cada dimensión del desarrollo sostenible a partir de un gran número de indicadores, debido al limitado poder discriminatorio del DEA. Investigaciones divididas en estudios particulares relacionados estrictamente a alguna dimensión permiten evaluar a mayor profundidad el impacto de una política de acuerdo con dicha dimensión.

En relación con lo anterior Ortiz (2025) señala que la eficiencia económica sostenible se produce cuando, además de incluir variables ambientales, se hace un análisis económico, el cual permite evaluar la tecnología con la que los sistemas productivos logran sus resultados y se mantienen como referencias colocándose en la frontera de producción. Para ello se requiere medir la eficiencia productiva y la eficiencia ambiental, particularmente, la primera de evaluarse de forma desagregada desde sus componentes los cuales son eficiencia asignativa, eficiencia técnica y eficiencia económica.

En este sentido, la eficiencia técnica sostenible puede definirse como un componente de la eficiencia económica sostenible que evalúa el desempeño del proceso productivo de un sistema (sin considerar la eficiencia de asignación) dada la maximización de los productos deseados, o bien, la minimización de insumos y de los elementos no deseados, siempre y cuando se incorpore algún indicador relacionado con una o más dimensiones complementarias del desarrollo sostenible como lo pueden ser la ambiental o la social.

Capítulo 4

Revisión teórica de las políticas públicas

4.1 Introducción

En este capítulo se hace una revisión teórica – conceptual en torno a las políticas públicas. La intención es explicar los distintos estudios y concepciones que existen al respecto. En un primer momento se revisan distintas definiciones de las políticas públicas con la finalidad de delimitar un marco conceptual de entendimiento. En un segundo momento se explica el origen de las reflexiones y los estudios formales enfocados en las políticas públicas. En el tercer apartado se explica de manera general las concepciones fundamentales del ciclo de las políticas, así como su evolución. Finalmente, en los apartados posteriores se definen cada una de las etapas de las políticas exponiendo sus elementos y justificando su importancia.

4.2 Conceptualización de las políticas públicas

Las Políticas Públicas pueden ser definidas como la serie de acciones de los gobiernos con la finalidad de transformar la economía y la sociedad, teniendo como fin a la población (Peters, 2021). Por otro lado, (Lahera, 2002) señala que las políticas públicas se encuentran relacionadas con las acciones y flujo de la información que mantienen relación con los objetivos públicos, los cuales son definidos de manera democrática y cuyo desarrollo se encuentra a cargo del sector público, contando generalmente con la participación de la comunidad y el sector privado.

En este sentido, Martin *et al.* (2021) señalan que los dos aspectos principales que componen a las políticas públicas son el gobierno y el problema público. Del primero argumentan que, en un

momento inicial, la acción de los privados está fuera de las políticas públicas, sin embargo, hay ciertas instancias donde el sector público y el privado intersecan. Del segundo elemento, indican que los problemas públicos son aquellos que los gobiernos tienen la capacidad de resolver.

A partir de la definición anterior resulta relevante definir ahora el concepto de problema público. Montecinos (2007) señala que este no se origina por sí mismo y que depende de las personas encargadas de la toma de decisiones, ya que, desde el enfoque de las políticas públicas, estos problemas se encuentran vinculados con la formación de la agenda pública, de tal manera que no hay una manera objetiva de enmarcarlos.

Por otra parte, Tamayo (1997), define a las políticas públicas como el cúmulo de objetivos, decisiones y acciones efectuadas por los gobiernos con la finalidad de dar solución a un problema, el cual en algún momento particular el gobierno y los ciudadanos concibieron como una prioridad a resolver. La definición anterior, deja ver que, aunque por un lado Montecinos (2007) sugiere que los problemas públicos no se pueden definir de una manera específica, por otro, existen elementos que permiten distinguirlos. En primera instancia, deben ser prioridad en un momento determinado, es decir, ingresar a la agenda pública, lo cual se puede lograr por la movilización ciudadana o bien surgir desde los propios gobiernos, quienes, en segunda instancia, deben reconocer su capacidad para resolverlos.

Resulta relevante incorporar la definición de Hassel (2015), la cual expresa que las políticas públicas son un conjunto de decisiones de los gobiernos y otras organizaciones políticas para influenciar, cambiar o enmarcar una problemática o situación que ha sido reconocida desde la dimensión política por los hacedores de políticas o por el público en general.

En síntesis, las políticas públicas se pueden definir como el conjunto de decisiones, acciones y objetivos relacionados con los flujos de información y llevados a cabo por los gobiernos con la finalidad de realizar un cambio en la economía y la sociedad, y que están orientados a resolver problemas públicos los cuales están integrados en la agenda pública y surgen de la capacidad resolutoria e intención de los gobiernos, y de la acción política que, en ocasiones, puede estar

impulsada por los ciudadanos u otros agentes políticos que en un momento determinado los consideraron como prioritarios.

4.3 El origen de las políticas públicas

El surgimiento de la concepción vigente de las políticas públicas se relaciona con el nacimiento de la ciencia de políticas impulsada por Harold Laswell en la década de los cincuenta. Esta disciplina tenía como objetivo establecer un espacio común entre la interdisciplinariedad científica y la toma de decisiones de los gobiernos desde una perspectiva democrática. La guerra fría es el contexto histórico en el cual nace dicha disciplina, es por ello por lo que se encontraba orientada a integrar el conocimiento de las diversas disciplinas sociales, con la finalidad de poder atender las problemáticas de manera más responsable y eficaz bajo un escenario de escala elevada el cual era complejo y conflictivo (Aguilar, 1992).

De acuerdo con Aguilar (1992), este contexto alentaba al gobierno estadounidense, desde una visión moral y política, a emplear, a partir de una dimensión económica, sus insumos intelectuales y con ello incrementar la racionalidad de las políticas. A partir de estas motivaciones se dio respuesta a una demanda histórica sobre la constitución y actuación racional y científica de los gobiernos. Con lo que producto del trabajo de los economistas quienes habían aportado numerosas ideas en torno a los análisis costo-beneficio, así como del trabajo de los psicólogos, sociólogos y antropólogos que habían estudiado la propaganda, el uso de la información durante este periodo crítico y habiendo logrado gran influencia en las tomas de decisiones gubernamentales, Lasswell (1951) decide publicar el texto *La orientación hacia las políticas (The policy orientation)* con el cual se formaliza la idea de la ciencia de políticas (Merino, 2013).

En este texto fundacional de la ciencia de políticas, Lasswell (1951) argumenta que la orientación a las políticas implica un recorrido transversal por las distintas disciplinas científicas, el cual tiene dos dimensiones: la primera implica el proceso de la política, en el cual se incorporan métodos y conocimientos de las ciencias sociales para el desarrollo de la ciencia de la formación y ejecución de las políticas; mientras que la segunda se centra en los requerimientos de inteligencia, los cuales enmarcan la evolución del contenido de la información y su interpretación dirigida a los hacedores de políticas.

En relación con lo anterior, Lasswell (1951) indica que la ciencia de políticas debe establecer un método riguroso y asistido por el enfoque cuantitativo con la finalidad de hacer un mejor procesamiento de datos que lleven a producir interpretaciones importantes para la comprensión de los problemas relacionados con las políticas en un momento determinado. Para ello se hace presente la necesidad de considerar el contexto profundo y general de las principales situaciones vinculadas a estos problemas, con lo cual también se incluye una dimensión especulativa con la finalidad de hacer pruebas a priori de la ejecución de cambios en el contexto social antes de aplicarlos en una mayor escala, sin olvidar que el centro de esta disciplina está en la democracia.

Merino (2013) sostiene que gracias al enfoque de Lasswell (1951) se originó una amplia variedad de investigaciones relacionadas con la gestión y el diseño de las políticas públicas, con las cuales se han robustecido los paradigmas en torno a las políticas y la administración de los recursos con los que cuenta la sociedad para dar una solución a los problemas catalogados como centrales. Esto a su vez desalentó la búsqueda de una teoría general de la administración pública, y con ello centrar la atención hacia el estudio de las herramientas intelectuales, normativas, y técnicas más convenientes con el objetivo de diseñar y organizar el quehacer del Estado el cual es el enfoque de la ciencia de las políticas.

4.4 El ciclo de las políticas públicas

Para Ronit y Porter (2016), Lasswell es el principal referente de la fundación de la ciencia de políticas y uno de los más importantes académicos dentro de los estudios realizados a partir de la evolución de esta ciencia. Los autores señalan que Lasswell adopta una preferencia dominante por el estudio pragmático de los procesos políticos y sociales identificando elementos relevantes como factores institucionales y el contexto temporal de estos procesos.

Con base en el libro de Lasswell *The Decision Process: Seven Categories of Functional Analysis* de (1956), Ronit y Porter (2016) sugieren que se define el proceso de decisión de políticas como una categorización de las diferentes etapas en la toma de decisiones que incluye siete etapas: inteligencia, promoción, prescripción, activación, aplicación, terminación y evaluación, cada etapa

es frecuentemente ejecutada por actores especializados en turno debido a que cada una tiene una función específica.

Como refieren Ronit y Porter (2016) en el texto de Lasswell (1956), se define cada una de las etapas de la siguiente manera:

- **Inteligencia:** Etapa en la que se debe recolectar, evaluar y filtrar varios tipos de información en el proceso de toma de decisión. En este contexto, los datos deben ser críticamente examinados, debido a que no toda la información es confiable o relevante. Además, deben considerarse pasos posteriores, y las acciones planeadas deben ser con base en el valor y contenido de los datos disponibles.
- **Promoción:** Dado que los datos no permiten estructurar argumentos decisivos relacionados con la toma de decisión, en esta etapa se requiere encontrar argumentos que lleven al convencimiento para lograr ciertas acciones. Es importante considerar que pueden aparecer distintas alternativas de políticas y es probable que se necesite presentar un análisis costo-beneficio de cada una de ellas.
- **Prescripción:** Como una consecuencia del trabajo previo, es el momento en el que se adoptan reglas y se definen los problemas objetivos. No obstante, es posible que existan dificultades en la toma de decisión debido a la incertidumbre de las recomendaciones y los argumentos ya que los acuerdos se tienen que generar entre grupos que pueden ser conflictivos de acuerdo con un conjunto de procedimientos formales.
- **Invocación:** Se hacen presente expectativas relacionadas con el cumplimiento de las reglas adoptadas, por lo tanto, se debe expresar de forma clara las demandas de los organismos legales o, visto de otra manera, el comportamiento esperado por estos organismos, no obstante, esa aplicación es de carácter preliminar y debe funcionar como una preparación para las etapas siguientes.
- **Aplicación o implementación:** En esta etapa el comportamiento de los actores tanto de los encargados de examinar la implementación de las reglas como de quienes las adoptan, tienen que ajustar su comportamiento de acuerdo con la prescripción establecida. En esta etapa es importante monitorear a los actores que participan en el proceso de aplicación.

- **Evaluación:** Una vez que las reglas han sido preparadas, adoptadas e implementadas, es momento de evaluar los éxitos y fallas. Es importante establecer quien es el agente responsable de la evaluación, estas evaluaciones requieren ser medidas contrastando las prescripciones y estableciendo cuidadosamente los motivos de éxito y fracaso.
- **Terminación:** Con base en la evaluación en esta etapa se determina si el programa debe ser terminado o si bien, se continúa o se ajustan reglas. Si las reglas y estrategias se terminan, se puede recabar información que sirva para preparar nuevas reglas y con ello volver a empezar el ciclo de políticas.

Ronit y Porter (2016) argumentan que este modelo ha sido considerado como heurístico y llamado modelo de etapas debido a que identifica patrones generales del proceso de políticas. Señalan que el propio Lasswell no lo veía como la respuesta definitiva a la definición del proceso de políticas, y de hecho este modelo ha pasado por una amplia discusión desde diferentes puntos de vista, lo cual ha llevado a su aceptación, redefinición, abandono e incluso ha sido reemplazado por otros modelos.

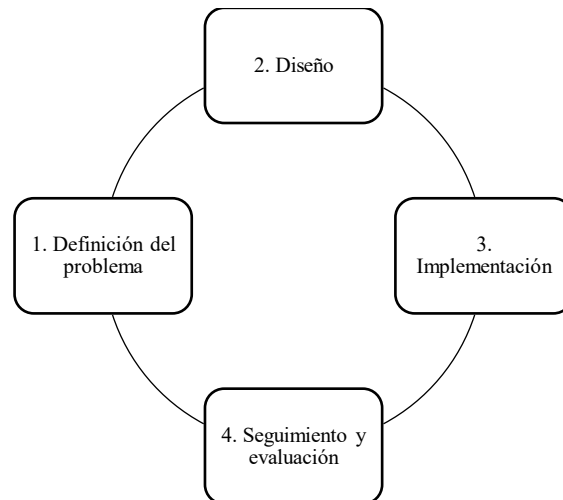
De acuerdo con Aguilar (1993b), tomando en cuenta la complejidad de los problemas sociales y los distintos problemas relacionados con la dimensión política y la acción gubernamental, las cuales parten de causas y situaciones heterogéneas, el proceso de políticas es más que un mapa cronológico, es una serie de componentes, los cuales son lógicamente necesarios con una gran interdependencia de los otros componentes, los cuales están estrechamente vinculados en la dimensión política, con ello también se hace visible la necesidad de considerar desde el ámbito de la ciencia política la construcción de la agenda de gobierno como una parte fundamental de este proceso.

En relación con lo anterior, Althaus *et al.* (2013), como se cita en Blomkamp *et al.* (2017), sintetizan, con base en los nuevos aportes y las consideraciones políticas, el ciclo de las políticas en ocho fases: la identificación del problema y el establecimiento de la agenda, el análisis de las políticas, el desarrollo del instrumento de las políticas, consulta, coordinación, decisión e implementación. Por otra parte, Arias y Herrera (2017) proponen un modelo más sintáctico enfocado por etapas, y considerando los múltiples elementos que las conforman, con la finalidad

de que se adaptable al marco teórico que más convenga para analizar un segmento particular del ciclo, apelando a la no mecanicidad del proceso. Su propuesta se puede observar en la siguiente figura:

Figura 4.1

El ciclo de las políticas públicas



Fuente: elaboración propia con base en Arias y Herrera (2017)

De acuerdo con Arias y Herrera (2017), las principales características que debe de tener el ciclo de las políticas públicas son: flexibilidad, es decir, que capture los hechos de la realidad; solidez metodológica, que permita una interpretación racional y coherente de la realidad; innovador, requiere de la creatividad para resolver situaciones nunca antes vistas, generar una retroalimentación a partir de lo aprendido; estratégico, que no se pierdan los objetivos fundamentales, incluso ante cambios y por último estos deben ser orientados a los impactos.

4.5 La definición del problema

Desde el enfoque cronológico del proceso de las políticas públicas, una vez que se ha establecido que un problema es de carácter público y que entra en la agenda, el siguiente paso es la definición del propio problema, no obstante, estas dos etapas son interdependientes, debido a que para colocar un problema en la agenda se requiere dar una aproximación a la definición del problema, de modo

que sea visto como tratable y que sea aceptado por el público pero principalmente por el gobierno (Aguilar, 1993b).

En un sentido más estructurado, Olaya y Gallego (2022) señalan que el punto de partida del problema público es cuando un hecho social sin una inherente connotación negativa o positiva sea transformado en un problema público. La primera fase en este proceso es la problematización, la cual surge del reconocimiento de una brecha entre lo que es y lo que debería ser. A partir de lo anterior, es que puede surgir la necesidad colectiva de hacer algo para lograr ese fin ideal deseado, lo cual puede traducirse en los objetivos y fines de la política pública.

La segunda fase mencionada por Olaya y Gallego (2022), es hacer consciente la necesidad de que algo se debe hacer al respecto, la cual aparece en el momento en el que un problema público es asumido como tal y deja su dimensión privada, ganando el interés de las autoridades gubernamentales, a este proceso se le conoce como la publicación del problema. En la realidad, estas fases suelen ser caóticas, debido a que un problema público no está aislado, por lo tanto, existe una red desordenada y compleja de los problemas públicos. En síntesis, un problema público es un problema de carácter operativo, el cual es apto para ser atendido por una política pública.

En hilo con lo anterior, Aguilar (1993b) argumenta que la complejidad de la definición de los problemas públicos tiene dos facetas, por un lado, la construcción de una definición aceptable no es sencillo, está expuesto a la polémica, debido a las distintas interpretaciones del problema y lo que algunos agentes consideran como problema, teniendo que buscar consenso, lo cual en la práctica es sumamente complejo. La segunda faceta es la necesidad de establecer una definición operativa que permita estructurar una política pública que emplee los recursos y herramientas de gobierno. Por lo tanto, los gobiernos y sus agentes especializados tienen que elaborar definiciones de problemas que sean solubles y aceptables, que, por un lado, sean legal y políticamente aceptables y, que, al mismo tiempo, fiscal y administrativamente viables.

A partir de lo antes descrito, Arias y Herrera (2017) advierten que un diagnóstico erróneo del problema público puede no visibilizar la problemática real de una comunidad, y por ende las políticas públicas encaminadas a resolver esos problemas estarán destinando recursos y esfuerzos

en resolver un problema que en realidad no es un problema público, en estos casos la propia definición del problema puede ser el problema. Ante este cúmulo de problemas interconectados, la imposibilidad de distinguir límites claros de los problemas públicos y el no estar en posibilidad de distinguir cuando termina un problema y empieza otro, expresa una falla en la estructuración del problema.

4.6 El diseño de políticas

El pilar central del diseño de políticas es el acto de divisar alternativas de políticas que alcanzan los estándares gubernamentales. Mientras es posible entender que algunas políticas no pueden ser constituidas de la manera adecuada, la intención de los gobiernos es comprender el por qué algunas políticas son correctamente desarrolladas. Con ello, se relaciona la necesidad crítica de reconocer y relacionarse con el completo entendimiento de las capacidades que implican un buen diseño de políticas, el cual escala de manera constante especialmente frente a los problemas públicos generalizados (Mukherjee *et al.*, 2021).

De acuerdo con Schneider y Ingram (1997), como se cita en el texto de Siddiki (2020), el proceso del diseño de las políticas se constituye por los fines y objetivos de la política, así como por la población objetivo, herramientas o instrumentos, instrucciones de implementación, reglas específicas de conducta y la lógica causal implicada que relaciona fines, objetivos e instrumentos. Los fines y objetivos de la política son los resultados buscados, los cuales la política busca inducir. La población objetivo son los individuos o grupos a quienes la política está dirigida. Y las herramientas o instrumentos son los mecanismos específicos para lograr el comportamiento deseado.

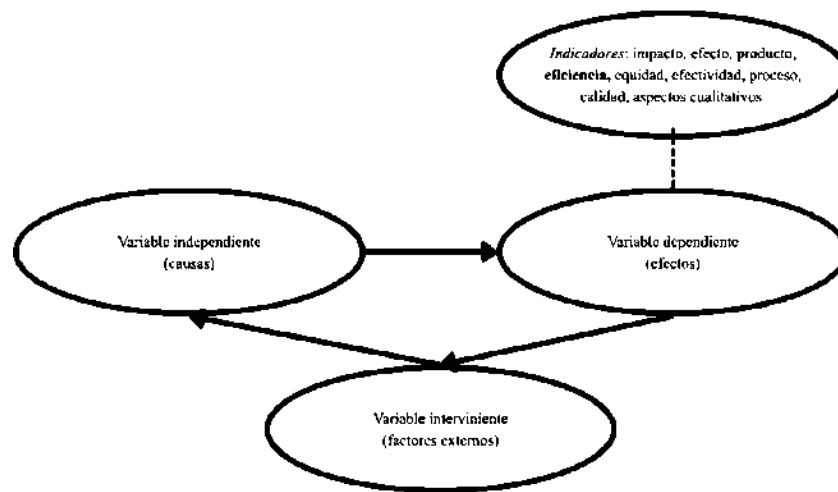
La lógica causal de la que hablan Schneider y Ingram (1997, como se cita en Siddiki, 2020), se puede vincular con un factor fundamental del diseño de las políticas del que habla Ortegón (2008), el cual es la relación de causa-efecto que establece las condiciones requeridas que permitan alcanzar las consecuencias buscadas de la política. Esta relación causa- efecto se compone por variables independientes, las cuales son todos los factores como decisiones, situaciones, circunstancias o acciones que forman parte de la política. Mientras que las variables dependientes

son todas las consecuencias, efectos, o productos generados por la variable independiente, es decir, por la propia política.

El enfoque causa-efecto abre la posibilidad a la articulación y ordenamiento de las piezas que conforman a la política en relación con su coherencia y precisión (Ortegón, 2008). Esta explicación se puede resumir de la siguiente forma:

Figura 4.2

Relaciones causa-efecto de las políticas.



Fuente: elaboración propia con base en Ortegón (2008)

En congruencia a lo anterior, Cohen y Franco (2005) argumentan que en una política es posible emplear muchos recursos de forma incorrecta. Para evitarlo, en el diseño de las políticas públicas se debe establecer de manera acertada las relaciones causales de los medios y el objetivo planteado. Para ello, es fundamental definir el objetivo de manera adecuada sin confundirlo con los medios. El primero hace referencia al impacto que se busca en la población objetivo, el segundo está relacionado con la cobertura e inversión. A partir de lo anterior, también se hace fundamental identificar la población objetivo que debe ser atendida por la política dadas sus características.

4.7 Implementación de las políticas

De acuerdo con Revuelta (2007), al proceso que sucede entre la constitución formal de la política y los resultados finales que genera, se le conoce como implementación también llamada como “eslabón perdido”, debido a que es la etapa por medio de la cual la política se puede ver influida por actores o factores como variables independientes, las cuales tienen la capacidad de alterar, obstruir, o bien, apoyar el cumplimiento de sus objetivos originales.

Por otra parte, empleando una analogía propuesta por Bardach (1977), como se cita en el texto de Aguilar (1993a), la implementación es el proceso de acoplar cuantiosos y distintos factores que conforman a un programa público, factores que están en posesión de diferentes partes, las cuales no son dependientes entre ellas, por tanto, el convencimiento y la formación de acuerdos son la vía única para conseguir que cada parte coadyuve aportando los factores del programa que son de su dominio.

En congruencia con lo anterior, Arias y Herrera (2017) argumentan que la implementación como todas las etapas del ciclo de políticas es interdependiente de las demás y necesita de la participación ciudadana. Entre los factores que influyen en esta etapa se encuentran los insumos existentes, la coordinación de las personas involucradas en la implementación, la conciliación de los distintos intereses en torno a la política, la gestión de las relaciones de poder y la validación por parte de la población objetivo. Esta etapa no es estática debido a que su constitución está definida por las distintas interacciones entre las instituciones, los cursos de acción y los propósitos de la política.

En la etapa de implementación el rol de las instituciones intervinientes y su calidad es fundamental, no sólo refiriéndose a la estructura formal, sino también al conjunto de prácticas que surgen del cúmulo del comportamiento social, como normas, reglas o cuestiones morales. Es a través de dichas estructuras que se definen las características de participación de los actores, las normas bajo las cuales se lleva a cabo la interacción, así como la asignación de responsabilidades. Es por ello por lo que, se dice que la implementación de las políticas está subordinada a la calidad de las instituciones y a la manera en la que conviven en sus actividades cada uno de los actores más relevantes (Ortegón, 2008).

A partir de la complejidad de la definición y estudio de la implementación han surgido distintos sistemas de implementación y resultados, los cuales Parsons (2007) define como un estudio de las perspectivas sobre el análisis del proceso de implementación partiendo de una combinación de factores institucionales, valores y mecanismos vinculados con el proceso de ejecución de las políticas públicas.

Uno de los enfoques más ampliamente reconocidos es el racionalista o también llamado de arriba hacia abajo. Este sistema se centra en la capacidad de unir eslabones para establecer una cadena causal y con ello ejecutar las políticas. Desde esta perspectiva, la efectividad de la implementación está condicionada a la manera en la que los eslabones están relacionados con las distintas agencias involucradas. El sistema depende de la definición clara de las metas y su comprensión, los insumos deben ser accesibles y la secuencia de órdenes debe tener la capacidad de vincularlos y gestionarlos. En todo el proceso se hace indispensable la comunicación efectiva, así como el control de las organizaciones e individuos que llevan a cabo las actividades (Parsons, 2007).

Una de las principales críticas que se ha hecho del modelo racionalista (de arriba hacia abajo) tiene que ver con su visión de la implementación con una naturaleza jerárquica, la cual requiere de un alto control y coordinación basada en una cadena efectiva de órdenes. Esto pone mayor énfasis en la delimitación de los objetivos en los niveles más elevados de la jerarquía subestimando el rol de los trabajadores en las líneas de producción. Es por ello por lo que han surgido modelos alternativos como el de abajo hacia arriba, el cual está enfocado en favorecer la participación de los actores colocados en la base de la jerarquía de la implementación, considerando mayor flexibilidad del proceso, ya que la implementación rara vez parte de una lógica causal (Parsons, 2007).

4.8 La evaluación de las políticas públicas

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2022), la evaluación de las políticas públicas se define como el análisis y valoración estructurada y basada en evidencia del diseño, implementación y resultados de una intervención pública completada, en desarrollo o planeación. En esta etapa se revisa la relevancia, coherencia, eficiencia, efectividad, impacto o sostenibilidad de una política con base en sus objetivos.

En sentido a lo anterior, el estudio de la evaluación de las políticas públicas se centra en la explicación del actuar público con base en los efectos que genera en la sociedad, motivo por el cual debe sustentarse en evidencias. Los estudios de la evaluación suelen categorizarse en dos áreas, por un lado, en el análisis de impacto de los programas y el actuar de los gobiernos en la resolución de los problemas públicos y, por otro lado, en la cuantificación de los resultados de las intervenciones públicas, buscando ir más allá de la producción de indicadores en torno a bienes y servicios. Esta etapa tiene un valor importante en torno a la retroalimentación del proceso cíclico de las políticas públicas (Gómez, 2014).

La evaluación de las políticas públicas, de acuerdo con Gómez (2014), tiene dos dimensiones, a la primera se le conoce como el análisis retrospectivo, la cual considera como sujeto de estudio a los programas públicos cuya finalidad es evaluar un programa de acuerdo con su desempeño. La segunda dimensión se centra en el análisis racional de la toma de decisiones con el objetivo de adquirir información que permita efectuar una retroalimentación al ciclo de las políticas. Las políticas públicas de evaluación han ido más allá de ser una herramienta de control administrativo interno basado en resultados, y han supuesto una manera de estudiar cómo los gobiernos actúan ante los problemas públicos.

La importancia de las políticas de evaluación de resultados radica en la necesidad de adquirir y compartir información relacionada con el quehacer de las instituciones y la manera en la que han empleado los recursos públicos. En este sentido, el enfoque transita de los insumos hacia los resultados, o bien, de los insumos a los impactos del actuar público. La finalidad de esta dimensión de la evaluación de las políticas es comprender la vinculación directa entre los insumos con los que se dotan las instituciones públicas y las unidades de desempeño que producen. Para lo cual se hace uso de indicadores concretos (Ortegón, 2008).

Ortegón (2008) argumenta que la evaluación de las políticas permite la obtención de información cuantitativa (y cualitativa) acerca de la generación de productos en relación con los bienes y servicios que se ofertan a la población. De este modo, la intención de la evaluación de resultados no está en el estudio del desarrollo de las actividades ni en el conjunto de indicadores que surgen en la evaluación de procesos sino en el análisis de la generación de productos por medio de los

procesos internos. En síntesis, los insumos y actividades de las instituciones públicas son parte del análisis interno, así como de la gestión de los programas como parte de procesos monitoreados, sin embargo, esto no es lo más relevante desde la perspectiva del impacto de las políticas públicas. De modo que el enfoque de la evaluación de las políticas públicas puede resumirse de la siguiente manera:

- Los impactos en relación con el propósito de la política pública.
- Las ampliaciones o efectos que tiene la política pública en relación con las condiciones de vida de la población objetivo.
- Los productos, bienes o servicios con los que se dota a la población a través de la política.
- Las cuestiones financieras como costos alrededor de las acciones de la política pública.

Finalmente, es importante señalar que la evaluación de las políticas no es la etapa culminante del ciclo de las políticas públicas sino el inicio del siguiente ciclo. En el sentido de que las políticas no surgen de forma espontánea, en la mayoría de los casos existen antecedentes de actividades ejecutadas en relación con el problema público de interés requiriendo casi en su totalidad de continuidad (Arias y Herrera, 2017).

Capítulo 5

La eficiencia a través del DEA en los sistemas públicos de transporte urbano y la política pública. Evidencia empírica

5.1 Introducción

La revisión de la evidencia empírica tiene un papel fundamental en la construcción del conocimiento científico, pues es este elemento lo que lo distingue de otras formas de conocimiento, así como de la pseudociencia McIntyre (2020). Este tipo de conocimiento basado en evidencia es fundamental para el desarrollo de las políticas públicas, permitiendo la toma de decisiones desde una mirada más estratégica e inteligente, lo que impacta de manera considerable en su calidad (Chaverri y Arguedas, 2020). Es por ello, por lo que se ha dedicado el siguiente capítulo a la síntesis de los artículos más relevantes en torno al tema de estudio. Estas investigaciones previas aportan miradas metodológicas que permiten enriquecer el presente estudio, así como a dilucidar el comportamiento del fenómeno que se está analizando.

Se abordan en un primer momento los estudios pioneros en el empleo de la metodología DEA en los sistemas de transporte público, a los que se les incorporan investigaciones contemporáneas. Se incluyen trabajos que analizan distintos sistemas de transporte, así como estudios multisistema. La segunda parte del capítulo se enfoca en investigaciones particulares a los sistemas de transporte público ferroviario urbano. Para agilizar la lectura del capítulo, se recomienda referirse a los anexos donde se comparte una tabla que sintetiza la información que se presenta a continuación.

Por último, el aparatado final de este capítulo se centra en la identificación de políticas públicas del transporte público a partir de estudios de revisión. Además, se comparten recomendaciones de

políticas de organismos internacionales elaboradas con base en la evidencia empírica, se distinguen recomendaciones generales, así como específicas para los sistemas de transporte ferroviario urbano.

5.2 Estudios generales de la eficiencia en el transporte público urbano

La revisión de la literatura demuestra que existe una tradición histórica del uso de la metodología del Data Envelopment Analysis (DEA) en estudios de eficiencia de los sistemas de transporte público urbano, sin embargo, los enfoques y las metodologías complementarias han cambiado a lo largo del tiempo. Uno de los artículos clásicos en este paradigma es el de Chu *et al.* (1992), el cual se enfoca en el estudio de agencias de autobuses de transporte urbano de pasajeros en distintas ciudades de Estados Unidos de América, los autores emplearon dos modelos DEA, uno con la finalidad de determinar la eficiencia de las agencias y, otro para evaluar su eficacia.

El modelo de eficiencia fue construido bajo las premisas básicas de la metodología, es decir, buscando minimizar los insumos y maximizar los productos, esta investigación utiliza un sólo producto (*output*) que son los ingresos anuales por vehículo-hora, mientras que los insumos que fueron contemplados son los gastos anuales operativos por vehículo, los gastos anuales en mantenimiento, los gastos anuales generales y administrativos, así como otros gastos anuales.

El enfoque del artículo de Chu *et al.* (1992) se centra en analizar la eficiencia en un sentido empresarial, como se pudo observar en la selección de variables, ya que se centra en maximizar los ingresos minimizando los gastos de operación, este tipo de modelos son convenientes sobre todo en los casos donde las Unidades de Toma de Decisión (DMUs) son agencias privadas que operan bajo el modelo de concesiones.

En esta misma línea se encuentra el trabajo de Boame (2004), el cual analiza la eficiencia de 30 sistemas de transporte público en Canadá durante el periodo 1990 a 1998, excluyendo sistemas especializados como los ferroviarios. Los insumos seleccionados fueron el número de autobuses en operación como una manera de expresar el tamaño de la flota, litros de combustible / energía

utilizados y el número de empleados pagados por horas trabajadas como medición de la dimensión trabajo. El producto (output) examinado en este estudio fueron los ingresos - vehículo - kilómetro, los autores sostienen que otro de los productos ampliamente reconocidos es pasajero - kilómetro, sin embargo, su elección metodológica del output empleado se basó meramente en la disponibilidad, además, sostienen que ese producto permite contemplar el problema de los autobuses vacíos.

Otro de los aportes principales del trabajo de Boame (2004) es el empleo de un modelo de regresión Tobit complementario, con la finalidad de evaluar la incidencia de factores contextuales que están fuera del alcance de los operadores. Las variables independientes seleccionadas para esta parte del análisis fueron la velocidad promedio como un indicador de la congestión urbana, la ratio de horas punta y valle con la finalidad de integrar la intensidad de la operación que se encuentra sensible a los patrones externos de demanda, la edad de la flota como una forma de integrar las probabilidades de que una unidad esté averiada, por último, se incluyó la variable de tendencias temporales con el objetivo de evaluar la mejora general de la industria en términos de tecnología y, de toma de decisiones operativas y de gestión, de acuerdo con las limitaciones en sus recursos. La variable dependiente de la regresión fueron los niveles de eficiencia obtenidos en el modelo DEA.

Finalmente, Boame (2004) realizó un procedimiento Bootstrap con la finalidad de corregir los niveles de eficiencia que pudieran estar sesgados debido a ruido y errores de medición de los datos, esto permitió identificar diferencias entre los niveles medios de eficiencia con respecto a los valores ajustados por el Bootstrap, así como de los valores máximos y mínimos obtenidos en el modelo DEA, identificando un sesgo con tendencia a determinar sobreestimar el puntaje de eficiencia de las DMUs.

En el contexto del análisis de sistemas de autobuses de transporte público se añaden los aportes realizados por la investigación de García-Sánchez (2009) para 24 ciudades españolas, la selección de inputs consistió en la cantidad de trabajadores de tiempo completo, consumo de combustible, el número de autobuses en operación. Mientras que los productos fueron seleccionados bajo la lógica de oferta y demanda estos son vehículos-kilómetros, capacidad de asientos medido como el número total de asientos, la cantidad de horas en servicio y la cantidad de pasajeros. Con la

finalidad de evaluar factores más complejos de la calidad del servicio se añadieron los productos frecuencia de servicio, comodidad (medido como la inversa de la edad de la flota), así como el número de paradas, reflejando accesibilidad, por último, se empleó un indicador a la inversa del número de accidentes con la finalidad de representar la seguridad.

El modelo elaborado por García-Sánchez (2009) es un Análisis Envolvente de Datos con la finalidad de evaluar los niveles de eficiencia técnica, técnica pura y a escala, además, al igual que Boame (2004), realizaron una regresión Tobit con la finalidad de analizar el impacto de las variables contextuales. Los resultados arrojaron que los niveles de eficiencia técnica fueron posibles de estimar a través de los niveles de eficiencia técnica pura y eficiencia a escala.

En torno a los medios de transporte urbano de baja capacidad, se rescata el trabajo de Delfín y Melo (2017), el cual realiza dos modelos DEA uno con rendimientos constantes a escala y rendimientos variables a escala, y con orientación hacia los outputs, la particularidad de este trabajo, a diferencia de los descritos anteriormente, es que se enfoca en evaluar la eficiencia de las rutas de transporte en lugar de sistemas enteros. Los insumos contemplados en este trabajo fueron el número de unidades como el número total de unidades en circulación, la frecuencia del servicio medida como el tiempo transcurrido entre el paso de dos unidades y las horas de servicio al día. Los productos seleccionados consistieron en el número de viajes realizados medido como la cantidad de recorridos que cada unidad da en su circuito por día y, los kilómetros que cada unidad recorre en su circuito. Se indica que se descartaron variables como la tarifa, ya que este era la misma para todas las DMUs, al igual que el número de pasajeros y la recaudación por vehículo, debido a su variabilidad y consistencia de los datos. De este trabajo, también es importante resaltar el análisis de holguras (*slacks*) que permite la toma de decisiones en torno a qué inputs deben reducirse y cómo deben aumentar los productos para alcanzar mejores niveles de eficiencia, determinando que ciertas rutas debían disminuir la cantidad de sus insumos o incrementar la frecuencia y cuáles debían completar más recorridos o extender su cobertura.

El artículo elaborado por Sujakhu y Li (2020) evalúa los niveles de eficiencia de las rutas de autobús de la corporación Sajha Yatayat que opera en el valle de Kathmandu en India para el año 2013. El análisis se hace considerando a cada una de las rutas como una DMU. Las variables

seleccionadas fueron: tiempo medio de viaje redondo, promedio de operadores al día, número de autobuses al día, y número total de paradas, como inputs; y la cantidad promedio de pasajeros al día y los kilómetros - vehículos recorridos al día, como outputs. El modelo DEA es un modelo orientado al output con la finalidad de hacer énfasis en la atracción de nuevos pasajeros dados los insumos con los que opera cada ruta, y se empleó la variación BCC, que asume rendimientos variables a escala. De forma complementaria al modelo de eficiencia se aplicó la metodología Mínimos Cuadrados Parciales (PLS).

Otro de los trabajos que aporta al análisis desagregado por rutas es el trabajo de Wei *et al.* (2017) el cual realiza un estudio de caso sobre las rutas del servicio operador de autobuses UTA localizado en Utah, Estados Unidos de América. En una primera etapa se aplicó un modelo DEA con rendimientos constantes a escala CCR orientado al output. Los inputs utilizados son tiempo total de operación por día, número de autobuses operativos diarios, y millas recorridas por día. Mientras que el producto considerado es el promedio de pasajeros por día. En adición al modelo de eficiencia se realizó un modelo de optimación espacial con la finalidad de contemplar factores como el acceso y de esta manera realizar una comprensión más holística sobre el desempeño de las DMUs.

En relación con el análisis a rutas particulares, pero con enfoque a modos de transporte de categoría B, según la clasificación por derechos de vía de Vuchic (2007), se rescata el trabajo de Hahn *et al.* (2009), en el cual se hace un análisis de la eficiencia de las líneas (rutas) de Autobuses de Tránsito Rápido de las 4 operadoras de Seúl, Corea, durante la primera mitad del 2008. Los insumos elegidos para el estudio consistieron en el número de vehículos, la distancia de la ruta, el número de paradas, los intervalos de paso y los costos de operación. Los productos seleccionados fueron el número de pasajeros y ganancias. El tipo de modelo DEA fue con rendimientos variables a escala (BCC) y con orientación hacia los insumos, bajo la justificación de que es inviable para el tipo de DMUs (líneas) asumir rendimientos constantes y que los factores de la demanda y ganancias son externos a las capacidades y decisiones de los operadores.

El trabajo de Hahn *et al.* (2009) realiza, de manera complementaria al modelo DEA, un modelo de regresión Tobit, con la finalidad de medir el impacto de las variables utilizadas en el primer modelo

en los niveles de eficiencia obtenidos, demostrando que todas las variables tienen un impacto significativo, pero destaca el intervalo de paso. Esto permitió a los autores realizar recomendaciones a los operadores en torno a la frecuencia, el número de autobuses y la longitud de la línea con la finalidad de mejorar su eficiencia.

El trabajo de Tsolas (2021) se enfoca en el estudio del desempeño de las rutas de trolebuses eléctricos de las ciudades de Atenas y Pirareus, Grecia. Se emplea un modelo DEA de dos etapas, el primero con rendimientos variables a escala (BCC), y orientado hacia el output con la finalidad de medir la eficiencia productiva. Para esta primera parte del modelo, los insumos considerados fueron tamaño de la flota, horas - trabajadores y electricidad consumida; los productos seleccionados consistieron en vehículo-kilómetro y viajes por ruta. En la segunda etapa, con el objetivo de determinar la eficiencia de las ventas, se consideró un modelo BCC, pero con orientación hacia los insumos, los cuales estuvieron integrados por los outputs considerados en la primera etapa (kilómetros - vehículo y viajes), y el producto seleccionado fue el número de boletos vendidos. Por último, el estudio realizó un análisis Bootstrap.

En cuestión de los estudios que combinan sistemas de transporte, una referencia importante es la investigación de Nayame *et al.* (2019), este trabajo analiza 335 agencias proveedoras de servicio de transporte urbano masivo en los Estados Unidos de América. El modelo empleado es DEA, tanto en rendimientos variables a escala como constantes (BCC y CCR), orientado hacia los insumos y orientado hacia los productos, además se realizó un análisis de super eficiencia. Se emplearon horas de trabajo, la densidad de la población servida y gastos totales de operación como insumos; mientras que los ingresos totales vehículo - millas, los ingresos por tarifa y el número de pasajeros no vinculados (se contabiliza cada que un usuario aborda una unidad). Parte de los resultados mostraron que el análisis de super eficiencia no fue factible para algunas de las DMUs, cabe destacar que los autores señalaron que esta variación metodológica permite distinguir los niveles de eficiencia de las DMUs con puntaje de 1 (es decir, totalmente eficientes) lo cual no es posible en los modelos clásicos.

El artículo publicado por Zhang *et al.* (2016) realiza la evaluación de los niveles de eficiencia de 13 operadores de transporte público en la región Delta de Yangtsé de China a través de la

metodología Super-DEA (SE-DEA) o super eficiencia con rendimientos variables a escala (BCC) y orientado hacia los insumos. Los insumos contemplados en el modelo fueron el número estándar de vehículos (se emplearon coeficientes de conversión para normalizar los diferentes tipos de vehículos), número de empleados y subsidio gubernamental; mientras que los productos incluidos fueron la satisfacción de los pasajeros (obtenido a través de encuestas) y los ingresos por tarifa. Además del modelo DEA se realizó un método de evaluación combinada con la finalidad de corregir errores que pudieran inferir en los niveles de eficiencia encontrados.

Una contribución adicional importante a los antecedentes empíricos de esta investigación es el estudio de Yao *et al.* (2019), enfocado en los sistemas de transporte público de 11 ciudades de China durante el periodo 2009-2016. La metodología empleada fue un modelo de DEA de redes (NDEA) y de super eficiencia (SE-DEA) con orientación al output, se buscó capturar la eficiencia productiva, la efectividad del servicio y de la operatividad. Los insumos elegidos fueron: subsidios, longitud de las líneas de autobuses, la longitud de las líneas previas de autobuses, empleados y vehículos. Como productos se escogieron las variables: vehículo-kilómetros, velocidad promedio, puntualidad, ingresos por boletaje, número anual y satisfacción de pasajeros. Con el objetivo de incluir las externalidades producidas por los servicios se utilizaron productos no deseados como el número de accidentes y como variables contextuales se consideraron el tamaño de la población y la tendencia al automóvil.

Otro de los trabajos con enfoque multimodal es el de Fitzová *et al.* (2018), el cual estudia la eficiencia de los distintos sistemas de transporte en República Checa. La selección de las DMUs estuvo basada bajo el criterio de que fueran empresas públicas de transporte desagregándose por ciudad debido a que una sola compañía en cada una. Se incluyeron diversos modos de transporte como autobuses, líneas de tranvía, trolebús y el metro de Praga. Los inputs empleados fueron: tamaño de la flota, empleados y costos energéticos. Sólo se consideró un output que consistió en número de pasajeros. El modelo aplicado fue un DEA con retornos variables a escala (BCC) y otro con retornos constantes a escala (CCR), con orientación a los insumos, argumentando que estos pueden ser ajustados con mayor facilidad por los operadores.

Hasta este momento, los antecedentes muestran que los modelos DEA permiten realizar estudios de eficiencia en el sector del transporte público en sus distintas modalidades, tanto de manera integral (evaluando sistemas completos) como de manera desagregada (a nivel de líneas o rutas), el número de pasajeros, el tamaño de la flota, la longitud de las líneas, la frecuencia y los kilómetros recorridos, son variables ampliamente utilizadas en estos estudios. Las especificaciones de los modelos, como su orientación, dependen en gran medida de los objetivos particulares de las investigaciones, sin embargo, se observa una mayor predominancia del uso de modelos con variaciones a escala (BCC). El uso de técnicas como el Bootstrap o el análisis de holguras dependen de las decisiones de los investigadores al igual que el empleo de modelos complementarios como las regresiones.

5.3 Estudios de la eficiencia en sistemas ferroviarios urbanos

Al igual que en el contexto general de los sistemas de transporte público, existe una importante tradición del empleo de la metodología DEA en el análisis de eficiencia de los sistemas ferroviarios urbanos de transporte de pasajeros. A continuación, se presentan algunos estudios de gran relevancia para los fines de esta investigación, haciendo especial énfasis en la técnicas y herramientas aplicadas, así como en las variables utilizadas.

El trabajo de Novaes (2001) sienta un precedente en la aplicación del DEA en el contexto de los sistemas de transporte de tránsito rápido con énfasis en los sistemas ferroviarios. El análisis estuvo enfocado en 21 sistemas de tránsito rápido a nivel internacional. El modelo aplicado está orientado hacia los insumos con aplicación de rendimientos variables y constantes a escala (BCC y CCR). Las Unidades de Toma de Decisión (DMUs) incluyen los sistemas de: Barcelona, Berlín, Buenos Aires, Caracas, Hong Kong, Lisboa, Londres, Madrid, Ciudad de México, Moscú, Nueva York, Osaka, París, Santiago, San Francisco, Sao Paulo, San Petersburgo, Seúl, Singapur, Tokio y Washington.

Novaes (2001) señala que en los estudios de eficiencia en el transporte público se debe tener especial cuidado en la elección de variables para una correcta construcción del modelo DEA, al respecto, en el estudio se realizó un análisis técnico del proceso de producción, dando como

resultado que una variable de insumos importante resulta de la operacionalización del número de vagones operativos, el número de estaciones y la extensión total del sistema que se expresa en la siguiente ecuación

Ecuación 5.1

$$X_1 = \frac{(C \times S)}{L}$$

Donde

X_1 = Indicador de insumo 1

C = Número de vagones

S = Número de estaciones

L = Extensión total del sistema

El resto de los indicadores de insumos utilizados en la investigación de Novaes (2001) son la frecuencia – horas en horas punta que se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 5.2

$$\frac{3,600}{H}$$

Donde H es el intervalo de paso, es decir, el tiempo transcurrido en segundos entre la salida de una unidad y la siguiente.

Otro de los indicadores empleado como insumo fue la extensión promedio de las líneas, la cual se calcula de manera simple dividiendo la extensión total del sistema entre el número de líneas, esta variable se integró bajo el supuesto de que un aumento en la extensión de la línea tiene un efecto positivo en la demanda. De igual manera, se incluyen las variables de número total de empleados y de población servida. El output elegido fue el número de pasajeros transportados por año.

El estudio elaborado por Tsai *et al.* (2015) se enfocan en la determinación de la eficiencia técnica, asignativa y económica en 20 sistemas de ferroviarios urbanos durante el periodo 2009 a 2011 a través de un modelo DEA con orientación hacia los insumos, bajo la premisa de que los insumos están en mayor control de los operadores y con rendimientos variables a escala (BCC) y con la aplicación de la técnica de Bootstrap. Los outputs considerados fueron vagón-kilómetro y número

de pasajeros. Mientras que los insumos seleccionados para el análisis de la eficiencia técnica fueron número de empleados, número de vagones y para el análisis de la eficiencia asignativa se incorporaron los insumos de costo por vagón y costo de la nómina. Por último, Tsai *et al.* (2015) realizan una regresión Tobit.

Otro trabajo importante de mencionar es el de Li *et al.* (2020) el cual hace un análisis de sistemas ferroviarios urbanos múltiples que se refiere a las ciudades en las que operan tres o más sistemas ferroviarios independientes, las ciudades seleccionadas en el artículo son: Londres, Tokio, Beijing, Shanghai, Guangzhou, Nanjing, Chengdu y Chongqing, se agregan dos DMUs hipotéticas de control, una con un desempeño pesimista y otra optimista. El modelo es un DEA mejorado, las variables que se incluyen como insumos son: número de sistemas, extensión total del sistema, capacidad promedio diaria, número de estaciones de transferencia, costos diarios promedio de operación y mantenimiento para cada uno de los sistemas. Mientras que la cantidad promedio de pasajeros transportados por día, los ingresos diarios promedio por boletaje y el desarrollo integral diario de los recursos en promedio son las variables que conformaron a los outputs.

Una de las investigaciones más recientes en torno a la evaluación de la eficiencia de sistemas ferroviarios urbanos es el trabajo de Awad *et al.* (2023), el cual analiza 36 sistemas ferroviarios urbanos distribuidos alrededor del mundo durante el año 2016, se destaca que se incorporó el metro de la Ciudad de México como una de las DMUs. Se aplicaron dos modelos DEA con rendimientos variables a escala (BCC) el primero para toda la muestra y el segundo para un grupo específico. El artículo no menciona de manera explícita la orientación del modelo.

Los insumos empleados en el trabajo de Awad *et al.* (2023) se determinaron contemplando tres dimensiones: capital, trabajo y espacio, por lo tanto, los indicadores utilizados fueron número de vagones como representación de la flota, longitud de la red y el número total de horas de trabajo de los operadores. Mientras que el único output seleccionado fue vagones-kilómetros bajo el argumento de que el número de pasajeros es un factor exógeno y que el enfoque de la investigación estaba centrado en las capacidades de los operadores.

Se utiliza el análisis *Benchmarking* el cual considera la eficiencia de las DMUs con la finalidad de establecer referentes entre ellas. Además, se empleó un análisis *Bootstrap* con el objetivo de minimizar el ruido y los errores internos del modelo y con ello determinar puntajes más adecuados. De manera complementaria, se aplicaron modelos de aprendizaje computacional (*Machine Learning Models*) así como un análisis ANOVA para analizar las variaciones entre grupos.

5.4 Estudios de eficiencia interna de los sistemas ferroviarios urbanos

Hasta este momento se han revisado estudios que indagan en los sistemas ferroviarios urbanos de manera general. No obstante, el propósito de esta investigación es analizar dichos sistemas desagregados por líneas. Como se expuso en el apartado 5.1, los estudios desagregados en los sistemas de transporte público son frecuentes en la literatura, sin embargo, aún es necesario explorar el caso particular de los transportes ferroviarios urbanos ya que aún no existe una tradición sólida en análisis particulares, por lo que resulta pertinente revisar las principales configuraciones metodológicas con las que se han llevado a cabo este tipo de estudios.

Un estudio elaborado por Khursheed *et al.* (2024), realizó una investigación enfocada en analizar la eficiencia operativa, proximal y espacial de la línea azul del metro de Nueva Delhi, que es la más extensa del sistema. Se generaron tres modelos de tipo DEA y S-DEA, y la información fue recabada por medio de encuestas y fuentes oficiales. En el primer modelo se buscó determinar el nivel de eficiencia operativa, para ello se emplearon los insumos de distancia de acceso, distancia de egreso, duración del viaje abordo de la unidad y la frecuencia del Metro; mientras que el output considerado fue la ratio de interconectividad. Este modelo es el más cercano a lo que la presente investigación busca realizar, se destaca el uso de la variable de frecuencia, en el texto se señala que esta es una variable de suma importancia cuando se busca determinar los niveles de eficiencia, ya que se relaciona con el tiempo de espera de los pasajeros.

El segundo modelo se enfocó en analizar la eficiencia proximal, los insumos utilizados fueron distancia de acceso, distancia de egreso, tiempo de viaje abordo del tren, número de estaciones de correspondencia y tiempo total de viaje; el output seleccionado fue la suma del tiempo de acceso

y tiempo de egreso. Finalmente, el tercer modelo se enfocó en analizar la eficiencia espacial tomando como insumos el modo de acceso, el espacio con el usuario de pie, el espacio con usuarios sentados y la facilidad de estacionamiento; el output consistió en la segunda mejor alternativa al uso del metro.

Como se mencionó anteriormente, el artículo de Khursheed *et al.* (2024) hace un estudio desagregado por estaciones, por lo que es conveniente describir el trabajo de Zongbao *et al.* (2019), el cual realiza el estudio particular por línea utilizando como insumos el consumo de energía eléctrica y el consumo de agua, mientras que el output son millas recorridas y la cantidad de pasajeros. El modelo empleado es un DEA con rendimientos variables a escala y orientado hacia los outputs. Es importante distinguir que el trabajo de Zongbao *et al.* (2019) emplea los meses del año como DMUs de modo que se elaboraron modelos particulares para cada una de las líneas, pero tomando como referencia la línea 2, de igual forma, se aplica un análisis de holguras.

Uno de los trabajos que mayormente se vincula con los objetivos de esta investigación, es el elaborado por Taboada y Han (2020), en el cual se hacen dos niveles de análisis, en primer lugar, se hizo una metodología exploratoria de datos (EDA) con la finalidad de determinar cuáles eran las variables (*inputs-outputs*) más adecuadas para determinar la eficiencia en los sistemas ferroviarios urbanos, en un segundo momento con las variables previamente definidas se realizó un modelo DEA aplicado a sistemas de tren urbano en comparación a otros sistemas de transporte público. Por último y el aporte más relevante de dicha investigación fue el empleo de un modelo desagregado por líneas para el sistema de metro de Londres.

El análisis EDA con la finalidad de determinar las variables de eficiencia y sustentabilidad en los sistemas ferroviarios urbanos se conformó por dos etapas, la primera fue una revisión de los indicadores empleados en la literatura, en un segundo momento se incorporaron las propuestas de variables de los autores con la finalidad de hacer un análisis más profundo.

Con respecto a los resultados del modelo EDA se señala que los indicadores más frecuentes en la literatura son extensión de la red, número de estaciones, número de trenes, frecuencia, cantidad de vehículos operados y el número de pasajeros, refieren que son indicadores fáciles de encontrar a

nivel sistema, pero difíciles de encontrar a nivel línea, se menciona, incluso, que aproximadamente sólo el 9% de los artículos tienen acceso a datos nivel línea a través de fuentes oficiales abiertas, por lo tanto, la propuesta recae en hacer un análisis de los datos abiertos a través del *Big-data*, con la finalidad de encontrar las variables más prácticas. En consecuencia, el autor sugiere la siguiente propuesta de indicadores clave:

- Número de trenes por línea.
- Ratio de ocupación.
- Trenes por hora.
- Tiempo de viaje.
- Tiempo excedente a la jornada.
- Número de pasajeros estimado por la entrada o salida a las estaciones.
- Dióxido de carbono consumido determinado por el consumo eléctrico por línea multiplicado por el CO₂ consumido.

En la segunda etapa se presentan los modelos de eficiencia, uno de los aportes más importantes de este trabajo radica en la selección de los insumos en el modelo desagregado por líneas, los cuales consistieron en el número de estaciones, así como en la frecuencia semanal. Con respecto a la cantidad de estaciones, los autores señalan que la inversión es uno de los factores fundamentales a considerar, sin embargo, el uso de datos precisos de inversión monetaria puede ser conflictivo debido a las variaciones en el tiempo y a que pocas veces se cuenta con la información desagregada por líneas, se argumenta que una de las alternativas más empleadas en la literatura es la extensión de la línea, la cual también es de fácil acceso, sin embargo, comparaciones entre estudios sobre costo-kilómetro han demostrado una mayor variabilidad cuando se interpreta en términos de inversión debido a las múltiples modalidades de instalación (subterráneo, elevado o al nivel) de modo que la elección de número de estaciones resulta ser más adecuada.

En cuestión al insumo frecuencia semanal Taboada y Han (2020) expresan que en los antecedentes empíricos se emplean comúnmente indicadores como costo de la mano de obra y de combustible, sin embargo, se señala que en la mayoría de los sistemas estos elementos se asignan de manera general lo que dificulta el análisis desagregado, de modo que la frecuencia incorpora en sí

capacidades del sistema administradas de acuerdo con distintos niveles de intensidad de las operaciones (horas punta y días laborales).

Los autores sostienen que la combinación de los insumos seleccionados (frecuencia semanal y número de estaciones) tienen una alta correlación con la mayoría de los insumos utilizados en el estado del arte como la longitud de la línea, la fuerza de trabajo y el número de vehículos, incluso aseguran que la elección de estos insumos permite reducir interferencias en el modelo al eliminar variables redundantes. Se sugiere que, si se desea incorporar más variables al modelo, la capacidad de pasajeros, así como variaciones en los patrones de abordaje de acuerdo con las horas punta y valle y en fines de semana pueden ser indicadores viables y adecuados. Los productos seleccionados fueron la cantidad de pasajeros transportados, debido a que es uno de los más comunes de la literatura y fue de fácil acceso en el estudio particular. Los autores señalan que la cantidad de insumos (2) y de productos (1) estuvo limitada debido a la cantidad de DMUs ya que el sistema de metro de Londres sólo tiene 10 líneas operativas.

Las especificaciones del modelo DEA en el artículo de Taboada y Han (2020) es que asume rendimientos constantes a escala (CCR), dado que las líneas de un sistema operan de formas comparables y son planificadas bajo una expectativa de demanda constante. Así mismo, el modelo se considera orientado a los insumos bajo el argumento de que los recursos son los que están en mayor control de los operadores a comparación de los productos.

Otro de los trabajos cercanos a esta investigación es el trabajo de Brum y Alves (2022), el cual evalúa a las principales operadoras de la red de metro de Brasil, si bien, no lo hace por línea, llega a un nivel más particular que al análisis de sistemas completos. Esta investigación emplea la variable de consumo eléctrico como un insumo sin incorporar productos no deseados.

En cuestión de la medición de la eficiencia energética y la eficiencia sostenible a nivel de línea, Zhang *et al.* (2022) puntualiza que la literatura es limitada al nivel de línea y propone la incorporación del consumo energético como un insumo y las emisiones de CO₂ con un producto no deseado como las principales variables energéticas y ambientales en adición a las variables operativas tradicionalmente empleadas, aplica este modelo para 61 líneas de metro en China

localizadas en diferentes sistemas, este trabajo es una aproximación importante al objetivo metodológico de esta investigación.

Como se dio evidencia, existe una amplia dimensión de la literatura que emplea los modelos DEA en el contexto del transporte urbano en general y en los sistemas de transporte urbano ferroviario, lo cual ha generado un extenso panorama en cuestión de las variables y especificaciones metodológicas comúnmente utilizadas, sin embargo, también es posible notar que estas dependen de los objetivos particulares de las investigaciones. Los estudios de Novaes (2001), Taboada y Han (2020) y Zhang *et al.* (2022), enriquecen, en gran medida, las decisiones metodológicas de la investigación debido a las similitudes de sus enfoques y objetivos. Con base en estos antecedentes y en las características particulares de los objetos de estudio, se presentan a continuación las características metodológicas de la investigación.

5.5 La política pública en los sistemas de transporte público ferroviario urbano

A partir de un estudio elaborado por Gallo y Marinelli (2020), se pudo identificar que los principales enfoques relacionados con políticas públicas para la movilidad sostenible pueden clasificarse en cinco categorías principales: políticas de transporte, políticas ambientales, políticas socioeconómicas, políticas orientadas a la tecnología y políticas de movilidad compartida.

En específico, se encontró que el transporte público tiene una presencia transversal en torno a las políticas de transporte. Se ha identificado en Europa una orientación hacia los transportes ferroviarios urbanos con propósitos centrados en la optimización del transporte público y la mejora de su eficiencia, implementación de energías alternativas que disminuyan el impacto ambiental, así como la transición hacia vehículos de cero emisiones. En torno a las políticas socioeconómicas se ha distinguido un alza al énfasis hacia la mejora de los servicios de transporte público con una orientación hacia la inversión y otros orientados hacia su calidad, relacionándose con la oferta de servicios de transporte público de calidad con altas frecuencias. Por último, en cuanto a las políticas enfocadas a la tecnología, se han encontrado intervenciones públicas que tienen como objetivo la implementación de Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) en los

sistemas de transporte público ferroviario, cuya finalidad es alcanzar la eficiencia, demanda y seguridad (Gallo y Marinelli, 2020).

A partir del trabajo de Herrera *et al.* (2025) se han identificado casos de estudio en la evaluación de políticas públicas de movilidad orientadas a la evaluación de los servicios públicos, en particular el caso de la ciudad de Fortaleza, Brasil (De Almeida *et al.*, 2023), en el cual se analizó el impacto de la información relacionada con datos del comportamiento de los usuarios en la gestión del transporte público desde la dimensión espacial y temporal, lo cual se tradujo en un mejor entendimiento de la demanda y la manera en optimizar los servicios de transporte público. Por otro lado, un estudio centrado en el Cantón de Azogues, Ecuador (León y Carriel, 2021), aplicó encuestas origen-destino para la comprensión de la demanda de los servicios de transporte público y con ello ofrecer una propuesta de intervención gubernamental en los ajustes operativos del transporte público.

De acuerdo con un reporte del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) elaborado por Rivas *et al.* (2019) en América Latina y el Caribe (ALC), se han adoptado diversas políticas que favorecen al transporte público invirtiendo en sistemas como Autobuses de Tránsito Rápido (BTR), teleféricos urbanos y sistemas ferroviarios urbanos, a través de esquemas de financiamiento basados en subsidios, sin embargo, estas políticas se han enfocado en mayor medida en los activos con un importante desafío en torno a la calidad de los servicios.

En este sentido, de acuerdo con la literatura revisada por Rivas *et al.* (2019), los subsidios orientados a la demanda han demostrado ser más efectivos que aquellos enfocados a los activos en gran medida, porque tiene como objetivo a los usuarios. En relación con lo anterior, la implementación de las TICs ha jugado un rol importante en las políticas enfocadas a la demanda, en especial la implementación de pagos electrónicos con tarjeta, sobre todo aquellas con chip de identificaciones de radiofrecuencia, lo cual permite tener información de tiempo real que a su vez ha permitido mejorar la eficiencia operativa, ya que esta puede ser empleada para el diseño del servicio. Otro de los aspectos tecnológicos importantes en las políticas de transporte público es el uso de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) para mejorar la certeza de los usuarios en la programación de sus viajes (William, 2017).

Los resultados del estudio de Rivas *et al.* (2019) han demostrado que las políticas públicas implementadas en la región de ALC han sido ineficientes en torno a la promoción de sistemas de transporte público eficientes y sostenibles, con lo que se ha demostrado la necesidad de políticas que apuesten por una mayor integración y más orientadas al servicio, resaltando la necesidad de que en el transporte público deben de integrarse de manera conjunta.

La falta de políticas de integración está relacionada con la administración de los sistemas lo que ha llevado a problemas de ineficiencia e ineficacia del transporte público. El estudio de Sharaby y Shiftan (2012) sugiere que la implementación de políticas de integración tiene como consecuencia un aumento en la demanda de los servicios de transporte público. Las políticas de integración pueden ser clasificadas en diversos tipos: integración física y de red, integración tarifaria, integración de la información e integración institucional (Rivas *et al.*, 2019).

En torno a las políticas de integración que consideran la gestión óptima de los insumos y recursos de los sistemas de transporte público, se identifican la integración física y de red. De este tipo de políticas, los sistemas de transporte público de Londres y Madrid son ejemplo debido a que cuentan con infraestructura adaptada para facilitar la transición de un modo de transporte a otro. En cuanto a la perspectiva de integración institucional, donde también dichas ciudades tienen una coordinación institucional, las cuales facilitan la integración de sus distintas modalidades de servicio de transporte público (Rivas *et al.*, 2019).

Existe una necesidad urgente en ALC para la implementación de políticas públicas de transporte público orientadas al servicio, por lo que se requiere cumplir con ciertos requisitos como la medición y el reforzamiento de la calidad del servicio. En sentido a lo anterior, los mecanismos que permitan monitorear la calidad del servicio deben ser mejorados, con un especial énfasis en la evaluación del desempeño con base en variables operacionales como pasajero – kilómetros o asientos – kilómetros. Se reconoce que en ALC, las condiciones para dicho monitoreo no son las adecuadas, por lo tanto, las políticas deben estar orientadas al desarrollo de estas herramientas con la finalidad de tener un mayor control de la calidad del servicio (Rivas *et al.*, 2019).

Para dicha finalidad, las ciudades deben desarrollar sistemas de monitoreo confiables y transparentes, los cuales tomen en cuenta las perspectivas de los proveedores del servicio y sus usuarios. Monitorear ambas visiones de forma regular es indispensable para asistir a las autoridades en las decisiones de políticas de transporte. En relación con este propósito, entran los sistemas de información en tiempo real, los cuales tienen costos relativamente bajos con un gran potencial para mejorar la eficiencia operativa y la satisfacción de los usuarios, en especial las tecnologías de localización y comunicación pueden contribuir al manejo de la flota y mejora en las operaciones. Las funciones o herramientas fuera de las de tiempo real pueden contribuir a la medición de desempeño y la planeación de operaciones (Rivas *et al.*, 2019).

En relación con los factores que influyen en la eficiencia de los sistemas de transporte público, están vinculados con la edad de la flota con la que operan los sistemas, por un lado, debido al aumento en las reparaciones y unidades fuera de servicio, así como por el aumento del énfasis en los factores ambientales, sin embargo, se hace la aclaración de que muchos de los problemas vinculados a estas características tienden a impactar la eficiencia en el largo plazo (Fitzová *et al.*, 2018).

Con relación a la planeación de políticas enfocadas a los sistemas ferroviarios urbanos se promueve una orientación hacia operaciones sostenibles que impactan en la eficiencia, esta orientación combina factores de planeación institucional, de desarrollo, y de oportunidades económicas, así como la aceptación social de esta visión sostenible. En un momento inicial las inversiones en los sistemas de transporte público ferroviario urbano no generan un cambio catalizador inmediato, pero puede reforzar cambios que ya se están efectuando. Para lo cual, resulta relevante señalar que las visiones técnicas deben vincularse con las visiones sociales con la finalidad de generar un acercamiento efectivo en la planeación de políticas (Yusoff *et al.*, 2021).

En el marco de políticas sostenibles de los sistemas de transporte público urbano ferroviario se identifican varios ejes verticales y horizontales. En el nivel vertical se sientan las bases a partir de elementos fundamentales relacionados con las distintas dimensiones de desarrollo sostenible como la económica, ambiental y social. En el nivel vertical intermedio entran los aspectos de la dirección y ejecución de las políticas; en el eje horizontal del diseño de políticas se considera la estrecha

relación que debe existir entre gobiernos – sector privado- sociedad; mientras que en la ejecución se consideran factores como la inversión estratégica para mantenimiento y la innovación ambiental. Las principales barreras a las que se enfrenta este marco de políticas es la falta de coordinación entre las diferentes instituciones y agencias y la falta de compromiso en la consolidación de este tipo de políticas (Yusoff *et al.*, 2021).

De acuerdo con Yusoff *et al.* (2021), en el énfasis a las políticas de inversión estratégica en transporte se implica la necesidad del uso del *big data* para asegurar que toda la planeación relevante relacionada con los datos sea aprovechada. En tanto, la inversión estratégica en transporte en el contexto de las políticas es una solución aparente a la movilidad eficiente, considerando el contexto de desarrollo bajo la mirada de la sostenibilidad. De modo que múltiples agentes acuerdan que el uso fundamental de la inversión estratégica es beneficioso para el contexto sostenible del desarrollo de las líneas ferroviarias urbanas.

Entre los principales desafíos que envuelven a los sistemas de transporte público ferroviario urbano es importante considerar la investigación de Eraso-Hernandez *et al.* (2024), en la cual se aplicó un modelo matemático para evaluar la reducción de transporte en este tipo de sistemas debido al daño acumulado en cada una de sus aristas. Dicha investigación demostró que la robustez de las redes de transporte público ferroviario urbano es producto de una interacción compleja de su topología como múltiples vías de la red que llevan a un mismo punto, generando así rutas alternas para los usuarios, así como de su capacidad para resistir daños en cadena, productos del mantenimiento y reparación. Como consecuencia, se resalta la importancia que estas metodologías tienen con el fin de analizar diversos sistemas cuyo único objetivo es el de transporte, además, se añade la propuesta de buscar un principio general que permita predecir el efecto del daño directo de la estructura de la red sin la necesidad de aplicar metodologías predictivas complejas. Como dato relevante, esta investigación determinó que el metro de la ciudad de México tiene un nivel relativamente alto de resiliencia estructural, sin embargo, está por debajo de sistemas como el de Madrid, Seúl, Tokio, Nueva York y Londres.

La investigación realizada por Blanco *et al.* (2020), propone una metodología para la planeación de las frecuencias e intervalos de paso para los sistemas de transporte público ferroviario urbano a

partir de un modelo matemático de toma decisiones basadas en la programación. Toma en consideración distintas mediciones de calidad y de operación para una planeación factible. Se incorporaron funciones de costo integrado y orientadas a pasajeros, así como demandas ajustadas a ciertos periodos en conjunto con decisiones estratégicas de planeación. Esta representación emplea un modelo de optimización basado en suposiciones para evaluar innovaciones tecnológicas y de operación potenciales

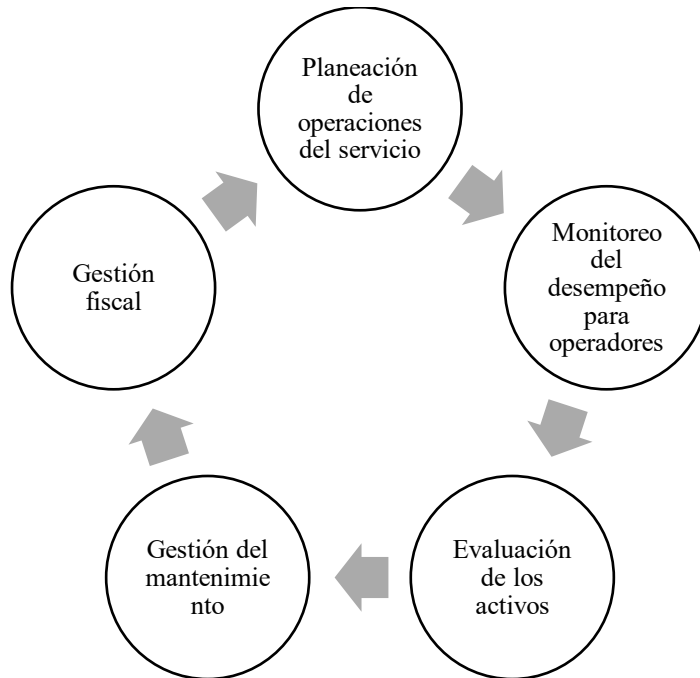
Los sistemas de transporte público urbano ferroviario son complejos, en este sentido, una perspectiva entorno a las políticas orientadas a su calidad, eficiencia y efectividad, es la corriente orientada a la resiliencia. Esta corriente tiene como objetivo la rápida reacción de los sistemas de transporte ferroviario urbano ante cambios o fenómenos adversos, así como la absorción de las perturbaciones, la mitigación de pérdidas y las rápidas recuperaciones. Para lo cual proponen modelos de evaluación como métricas topológicas, métricas de sus propias características y métricas del desempeño del sistema, esto con la finalidad de mejorar el servicio, disminuir la congestión y facilitar los viajes. Las propuestas de evaluación son la implementación de metodologías de estudio de la topología, de simulación, de optimización y orientadas hacia los datos (Wei *et al.*, 2024).

Se hacen distintas recomendaciones en torno a la gestión resiliente de estos sistemas de las que destacan resiliencia basada en datos multicriterio, control combinado del flujo de pasajeros basado en respuesta a múltiples demandas, optimización de los diagramas de tren considerando múltiples escenarios y la integración de la optimización del flujo de pasajeros y flujo de la flota (Wei *et al.*, 2024).

La operación sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano es compleja y requiere un conjunto de diferentes herramientas y capacidades. Estos sistemas requieren prestar un servicio de forma continua con el desarrollo de proyectos para mantener, renovar y mejorar el sistema. Con ello existen responsabilidades de los operadores de los sistemas en relación con su operación y gestión, una vez que se ha dotado de infraestructura a estos sistemas, su operación requiere un acercamiento tecnológico y estratégico. A continuación, se muestra el ciclo de los cinco pilares de las operaciones sostenibles de los sistemas de transporte público ferroviario urbano:

Figura 5.1

Ciclo sostenible de las operaciones de los sistemas de transporte público ferroviario urbano



Fuente: elaboración propia con base en Darido *et al.* (2018)

En relación con el plan de operación del servicio, se dice que establece el marco de los niveles de servicio y los requerimientos de la flota. En el corto plazo este plan establece objetivos para asegurar que el sistema provea un servicio adecuado y que la dotación de la flota alcance a cubrir los estándares de demanda. Mientras que, a largo plazo se debe planificar el crecimiento de la flota y mejoras en la infraestructura para alcanzar y alentar la demanda futura. En esta fase, se toman en cuenta las restricciones o limitaciones de la infraestructura, sistemas de control de los trenes, capacidad de los trenes y los vagones, capacidad de las estaciones, horas de servicio, demanda de pasajeros y equidad. El producto clave de la planeación del servicio en el corto plazo es la planificación horaria, la cual se compone de los intervalos de paso, tiempo de recorrido de estación terminal a estación terminal, cantidad de trenes de manera simultánea en el servicio, cantidad de trenes de emergencia y auxiliares y horarios y provisión del servicio (Darido *et al.*, 2018).

Con relación a la fase de monitoreo resulta del contraste entre la planeación de la operación y las condiciones reales de operación. La medición y reporte del desempeño es fundamental para los operadores de servicios de transporte público ferroviario urbano, lo cual permite evaluar la calidad del servicio, deficiencias en las operaciones y en la infraestructura, así como oportunidades de mejoras potenciales en los planes existentes. La evaluación del desempeño suele hacerse en tres etapas: 1) establecimiento de indicadores de desempeño, 2) determinación de la frecuencia de los reportes 3) síntesis efectiva y la comunicación de resultados (Darido *et al.*, 2018).

Los indicadores generales de desempeño a nivel línea suelen ser velocidad de operación como una representación de las condiciones de la infraestructura y del material rodante; el intervalo de paso con la finalidad de balancear la prestación del servicio con respecto a los patrones de demanda; confiabilidad, el cual es un indicador que mide la puntualidad y cumplimiento de la planificación operativa; máximo volumen de carga, que mide la congestión de los trenes, el volumen de ocupación de los vagones, así como el tiempo de permanencia que es el tiempo que transcurre entre la llegada de un tren y el comienzo de traslado a la siguiente estación. En relación con los indicadores de estaciones resaltan los andenes, el tipo, su capacidad, número y ubicación, también se resalta la cantidad y calidad de elevadores, escaleras eléctricas y escaleras convencionales, de igual forma se distingue como indicador la capacidad y calidad de los puntos de acceso (Darido *et al.*, 2018).

Una vez obtenidos los indicadores, la siguiente etapa de la evaluación de los activos es la determinación de la frecuencia con la que se publican los reportes, para lo cual se debe considerar el tiempo de recolección y análisis de los datos, las habilidades de las personas encargadas de la evaluación, así como de la capacidad de las herramientas para la obtención de la información. Finalmente, en esta fase del ciclo de operación y gestión deben comunicarse los resultados, esta difusión debe incluir gestores, actores de gobierno, las comunidades locales, entre otros (Darido *et al.*, 2018).

La tercera fase denominada evaluación de los activos, es importante sobre todo en sistemas de transporte público ferroviario urbano debido a que, a comparación de otros modos de transporte público, estos sistemas requieren de fuertes cantidades de inversión, la cual debe ser destinada para

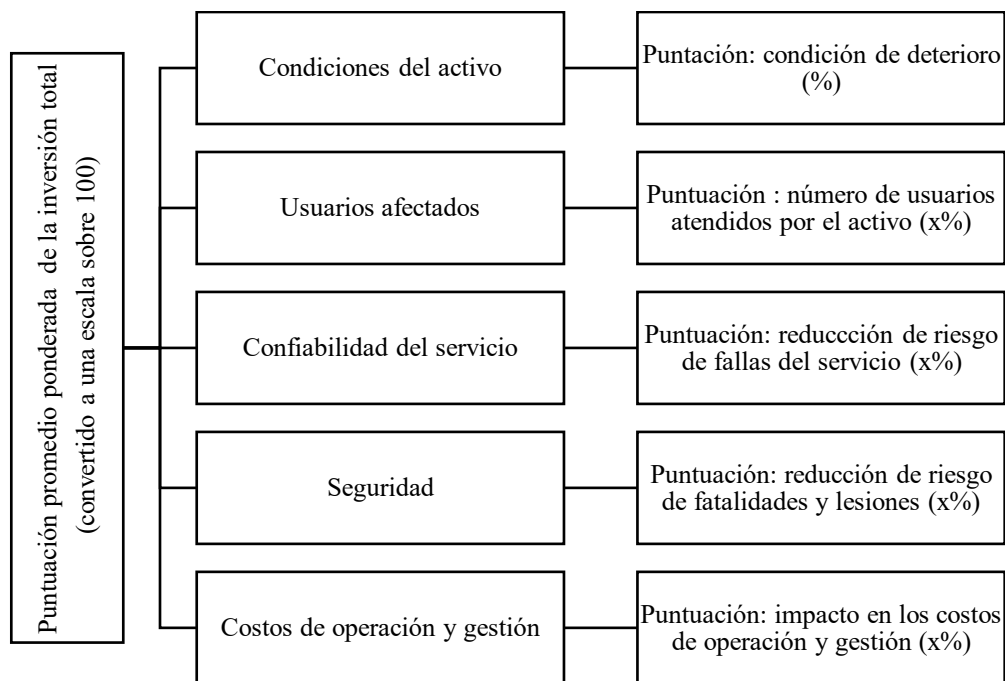
maximizar la capacidad potencial de los sistemas. La gestión de activos necesita ser proactiva y debe ser planeada e implementada en cuanto el sistema es inaugurado. Esta etapa tiene un objetivo holístico más que de mantenimiento regular, el cual debe ser ajustado a las propias características del sistema (Darido *et al.*, 2018).

La parte fundamental de la evaluación de activos es la realización de un inventario, se deben definir agrupaciones jerárquicas con la finalidad de realizar un conteo adecuado, en seguida, se deben definir los atributos de los datos, los más importantes son antigüedad, vida útil, cantidad, ubicación, rehabilitaciones pasadas, fechas de las inspecciones más recientes y programadas, inspecciones físicas sobre su condición, kilometraje (para la flota), tamaño del área (instalaciones) o longitud (vías) así como los costos de rehabilitación. Tales características son insumos para priorizar las necesidades de los activos y desarrollar proyectos de mejora (Darido *et al.*, 2018).

La segunda etapa es la priorización de activos, dado que los sistemas de transporte público ferroviario urbano requieren de grandes cantidades de capital para el mantenimiento se debe hacer una asignación estratégica, priorizando aquellos activos con mayores necesidades de reparación, rehabilitación o reemplazo. Un esquema multicriterio es el siguiente:

Figura 5.2

Priorización de los activos usando múltiples criterios



Fuente: elaboración propia con base en Darido *et al.* (2018)

A pesar de que la priorización de los activos es necesaria en el corto plazo, esta priorización, requiere llevarse a cabo con una estrategia de gestión fiscal de largo plazo, la cual dote los recursos para mantener todos los activos en un estado adecuado (Darido *et al.*, 2018).

En la cuarta fase llamada gestión del mantenimiento, debe establecerse un proceso para construir datos relacionados con el monitoreo de las condiciones de los insumos, así como la programación y financiamiento de la renovación de activos y las reinversiones en el nivel estratégico. A diferencia de la evaluación de activos, la gestión de mantenimiento ejecuta acciones de capital con el objetivo de preservar la infraestructura, material rodante y sistemas relacionados con la provisión del servicio (Darido *et al.*, 2018).

Los tipos de enfoque de mantenimiento son reactivo, preventivo y predictivo. El primero es basado en reparaciones, se hace un mantenimiento correctivo, se efectúa hasta que el activo falla, una de sus principales ventajas es que es de bajo costo en el corto plazo, las inspecciones son más

espaciadas y es útil para equipo eléctrico o mecánico con ciclo de vida corto, sin embargo, este tipo de mantenimiento puede ser ineficiente, da oportunidad a fallas inesperadas, toda vez que no existe una planeación, y aumenta el costo total del ciclo de vida. El segundo tipo es basado en reglas a partir de diagnósticos e inspecciones periódicas, se basa en la renovación por uso, la cual puede responder a criterios de tiempo o distancia, las ventajas de este enfoque radican en la disminución del costo del ciclo de vida, mejora la eficiencia y eficacia de las actividades de mantenimiento, incrementa los niveles de uso de la flota y disponibilidad, entre sus limitaciones está el incremento de las revisiones de mantenimiento y de las tareas y tiene como objetivo una mejora específica o eficiencia (Darido *et al.*, 2018).

El tercero, es basado en condiciones, con diagnóstico en tiempo real y monitoreo de los activos, sus principales ventajas radican en la mejora del material rodante, optimiza la programación de mantenimiento, evita mantenimiento innecesario, incrementa la efectividad a largo plazo, ajusta las intervenciones a requerimientos específicos; entre sus desventajas están el requerimiento de una recolección rigurosa de datos, personal altamente capacitado, dependiente de la implementación de tecnologías más sofisticadas, así como la dificultad para superar la inercia organizacional (Darido *et al.*, 2018).

Los programas de mantenimiento basados en el ciclo de vida son los más comúnmente utilizados en el mantenimiento preventivo. Este tipo de programas permiten a los sistemas de transporte público ferroviario urbano establecer rutinas de inspección y mantenimiento enfocadas a los activos que estén cerca del punto de falla. Para ello se requiere hacer suposiciones útiles para cada tipo de activo en el inventario, así como especificar la frecuencia necesaria de las rehabilitaciones. Con la incorporación en el mantenimiento de las consideraciones del ciclo de vida los sistemas encuentran una posición financiera más fuerte para gestionar los costos de operación y mantenimiento y mantener la calidad del servicio sin interrupciones (Darido *et al.*, 2018).

En relación con el mantenimiento de las instalaciones, los sistemas deben contar con equipos capacitados y especializados que lleven a cabo mantenimiento regular de las mismas. Los patios ferroviarios colocados estratégicamente entre la red tienen una función igual o mayor a las oficinas y los espacios de almacenamiento, debido a que en estos espacios se llevan a cabo las tareas de

mantenimiento como la limpieza de los vagones, rutinas de mantenimiento y reparaciones menores.

Independientemente del enfoque de mantenimiento adoptado, es imperativo tener ventanas temporales dedicadas a tiempo de inspección y mantenimiento del sistema. A pesar de algunos ejemplos notables de sistemas que llevan a cabo servicio ferroviario nocturno, la mayoría de los sistemas de transporte público ferroviario urbano han encontrado que tener una ventana temporal nocturna de mantenimiento todos los días es crítico para proveer un servicio seguro y confiable. Estas ventanas temporales nocturnas deben ser lo suficientemente largas para trasladar los equipos a su lugar de arranque (Darido *et al.*, 2018).

Finalmente, la última fase de operación sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano es la gestión fiscal. Los sistemas requieren de una gestión adecuada de egresos e ingresos. La estabilidad financiera permite a los sistemas operar y mantener servicios de calidad y planificar considerando eventuales costos de expansión. La planeación fiscal es llevada a cabo a partir del presupuesto anual, la perspectiva al corto plazo y proyecciones a largo plazo (Darido *et al.*, 2018).

Capítulo 6

Desarrollo metodológico

6.1 Introducción

En este capítulo se presentan las particularidades metodológicas de la investigación, así como su justificación. La elección de las variables y las características partió de la revisión de los antecedentes teóricos y empíricos que fueron presentados en los capítulos anteriores, se realizaron adecuaciones correspondientes de acuerdo con los objetivos y enfoques de este trabajo. Los modelos empleados son el Data Envelopment Analysis (DEA) que es de carácter no paramétrico y de frontera (DEA) contemplando como Unidades de Toma de Decisión (DMUs) las 17 líneas de los sistemas de tren urbano de pasajeros de México y su desempeño en los años 2023 y 2024.

6.2 Descripción de los modelos DEA

Los modelos de Análisis Envolvente de Datos (DEA) empleados en esta investigación fueron tanto con rendimientos constantes a escala (CRS también llamado CCR) planteado por Charnes *et al.* (1978) como con rendimientos variables a escala (VRS, también llamado BCC) propuesto por Banker *et al.* (1984). En la literatura revisada se emplean otras variaciones que asumen únicamente rendimientos constantes a escala (CCR) la cual fue utilizada por Taboada y Han (2020) bajo el argumento de que en los análisis desagregados por línea se espera que estas trabajen con una demanda e insumos constantes entre ellas al formar parte de un sistema más grande, sin embargo, esta investigación -a diferencia de Taboada y Han (2020) quienes se enfocan sólo en el sistema de metro de Londres- analiza distintos sistemas desagregados, por lo cual, resulta conveniente

emplear un modelo de eficiencia técnica global a escala conformado por la eficiencia bajo los modelos CRS y VRS debido a que los sistemas poseen distintas configuraciones demográficas y urbanas, patrones de demanda y capacidades operativas.

Se efectuaron dos enfoques metodológicos el primero un enfoque de medición de eficiencia técnica (sin variable ambiental) y otro enfoque de medición de eficiencia técnica sostenible con variable ambiental. Los modelos fueron estructurados con orientación hacia los productos (*output-oriented*) el cual analiza la capacidad de las DMUs de maximizar los productos generados dados los insumos con los que opera y minimizando la generación de productos no deseados. Los trabajos de Taboada y Han (2020), Novaes (2001) y Awad *et al.* (2023) emplean orientaciones a los insumos (*input-oriented*) en el cual se busca minimizar la cantidad de recursos con la finalidad de mantener la misma producción, estas investigaciones argumentan que los organismos operadores de los sistemas tienen un mayor control sobre el manejo de los recursos, no obstante, el enfoque del presente estudio se encuentra en evaluar cómo las inversiones en capital físico, capital móvil y el gasto en operaciones se han transformado en resultados tangibles como la cantidad de personas transportadas y la minimización de las emisiones indirectas de GEI.

De igual forma, es importante señalar que existen diferencias tecnológicas internas particulares entre los sistemas que se están analizando ya que operan con material rodante distinto cuya infraestructura está diseñada especialmente para determinado tipo de modelos, lo que imposibilita la redistribución de recursos en la mayoría de los casos. Así mismo, la adquisición de flota, la construcción de vías y estaciones y la cantidad de personal que permiten llevar a cabo las operaciones son insumos que requieren importantes montos de inversión los cuales en la mayoría de los casos son irreversibles o requieren de políticas de largo plazo para poder ser reestructurados.

Finalmente, desde el enfoque de las políticas públicas, bajo la orientación hacia los productos se puede evaluar qué tanto podría aumentar el servicio de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano sin realizar modificaciones a la infraestructura e inversión existente. Este enfoque fue empleado en estudios de líneas y sistemas de transporte público por Delfín y Melo (2017), Yao *et al.* (2019) y Zongbao *et al.* (2019) lo que respalda desde los antecedentes este tipo de orientación. Los resultados del modelo son expresados en valores entre 0 y 1 donde 1 es

el valor máximo o de eficiencia y 0 es el valor mínimo. Se elaboraron diferentes modelos para los años 2023 y 2024.

6.3 Selección de las Unidades de Toma de Decisión (DMUs)

Como ya se ha explicado con anterioridad los sistemas de transporte público ferroviario urbano que se están analizando en esta investigación son el Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC [Metro]), Sistema de Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara (SITEUR) y el Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey (STC [Metrorrey]) ya que los tres sistemas operan con tecnología similar (a pesar de sus diferencias técnicas particulares) y tienen el mismo objetivo que es la movilización de personas a través de vías férreas. Con la finalidad de hacer un análisis más profundo y metodológicamente robusto se tomó la decisión de estudiarlos de manera desagregada por líneas por lo tanto las Unidades de Toma de Decisión (DMUs) son las siguientes:

Tabla 6.1

Nomenclatura y presentación de la Unidades de Toma de Decisión elegidas

Nomenclatura	Línea	Sistema	Ciudad
CDMXL1	Línea 1: Pantitlán-observatorio	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	Ciudad de México
CDMXL2	Línea 2: Cuatro caminos - Tasqueña	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXL3	Línea 3: Indios verdes - Universidad	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXL4	Línea 4: Santa Anita - Martín Carrera	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXL5	Línea 5: Politécnico - Pantitlán	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXL6	Línea 6: El rosario - Martín Carrera	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXL7	Línea 7: El rosario - barranca del muerto	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXL8	Línea 8: Garibaldi - Constitución de 1917	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXL9	Línea 9: Pantitlán - Tacubaya	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXLA	Línea A: Pantitlán –La Paz	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	

CDMXLB	Línea B: Ciudad Azteca - Buenavista	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
CDMXL12	Línea 12: Tláhuac - Mixcoac	Sistema de Transporte Colectivo (Metro)	
GDLL1	Línea 1: Auditorio - Periférico Sur	Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR)	
GDLL2	Línea 2: Tetlán - Juárez	Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR)	Guadalajara
GDLL3	Línea 3: Arcos Zapopan – Central Camionera	Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR)	
MTYL1	Línea 1: Talleres-Exposición	Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey)	
MTYL23	Línea 2 y línea 3: Sendero – Hospital Metropolitano	Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey)	Monterrey

Fuente: elaboración propia con base en Sistema de Transporte Colectivo Metro (2025c); Sistema de Tren Eléctrico Urbano (2025b) y Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey (2025a)

Es importante volver a realizar la precisión de que el Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) opera la línea 2 y 3 de forma continua, por lo que realizan sus actividades con los mismos insumos y los pasajeros no requieren hacer cambio de línea ya que el recorrido se hace completo desde la estación Sendero que corresponde a la línea 2 hasta la estación Hospital Metropolitano de la línea 3. Una vez aclarando lo anterior se indica que el total de DMUs es igual a 17.

6.4 Especificación de los insumos, productos y producto no deseado empleados en el modelo

La selección de las variables es una parte fundamental de la construcción de los modelos DEA debido a su naturaleza no paramétrica, por lo que los resultados son altamente sensibles a la selección de los productos, insumos y productos no deseados (*output e inputs, undesirable output*) sobre todo, en muestras con un reducido número de Unidades de Toma de Decisión (DMUs).

Los insumos y productos seleccionados para el enfoque de eficiencia técnica (sin variable ambiental) son utilizados frecuentemente en la literatura y se presentan en la tabla 6.2:

Tabla 6.2

Insumos y productos seleccionados para el enfoque de eficiencia técnica (sin variable ambiental)

Insumos (Inputs)	Productos (Outputs)
-Frecuencia semanal de días laborales (F)	-Pasajeros transportados durante el año (P)
-Número de estaciones (S)	
-Capacidad de la flota (C)	

Fuente: elaboración propia con base en la literatura

Por otro lado, para el enfoque de eficiencia técnica sostenible con variable ambiental se consideraron los siguientes insumos y productos:

Tabla 6.3

Insumos y productos seleccionados para el enfoque de eficiencia técnica sostenible con variable ambiental

Insumos (Inputs)	Productos (Outputs)	Productos no deseados
-Frecuencia semanal de días laborales (F)	-Pasajeros transportados durante el año (P)	-Emisiones indirectas de GEI (E)
-Número de estaciones (S)		
-Capacidad de la flota (C)		

Fuente: elaboración propia con base en la literatura

A continuación, se presenta la justificación y caracterización de los insumos empleados. Los fundamentos teóricos como Ortúzar y Willumsen (2011), Vuchic (2007) y Molinero y Sánchez (1998) sostienen que los elementos que conforman a los sistemas de transporte público se componen por elementos de capital físico (infraestructura, vehículos...) y de capacidad operativa como lo es el manejo de la fuerza de trabajo y de los recursos físicos con los que cuentan, retomando la síntesis de Ortúzar y Willumsen (2011) en la ecuación 2.1:

Ecuación 2.1

$$Q = f(I, M)$$

Donde Q es la capacidad del sistema, I es la inversión (capital fijo y capital móvil o rodante) y M es el manejo o la capacidad operativa. Para términos de esta investigación esto puede sustituirse de la siguiente manera:

Ecuación 6.1

$$Q = f (C, S, F)$$

Donde C y S representan los elementos físicos del sistema (capital fijo y capital rodante respectivamente) y F representa la capacidad de operación.

Frecuencia semanal (F)

La frecuencia tal y como lo señalan Hahn *et al.* (2009) y Khursheed *et al.* (2024) es un elemento que incide en los tiempos de espera de los pasajeros y por ello es un elemento que impacta en la demanda. De acuerdo con Novaes (2001) se considera a la frecuencia como uno de los insumos que incide en la cantidad de pasajeros trasladados. Taboada y Han (2020) sostienen que la frecuencia también encierra elementos importantes de la capacidad operativa como lo señala Vuchic (2007) ya que implica el uso de la fuerza laboral, los insumos físicos, la energía consumida y la manera en la que el sistema es capaz de organizarlos y administrarlos.

En esta investigación se decidió ir más allá de emplear el intervalo de paso (tiempo que transcurre entre la salida de una unidad de transporte y la siguiente) y se contemplan las horas de servicio como en el trabajo de Delfín y Melo (2017) pero se distinguen distintas frecuencias de acuerdo con las necesidades del sistema que se producen en las horas punta y horas valle a partir de lo señalado por Ortúzar y Willumsen (2011). De igual forma Taboada y Han (2020) indican que son distinciones importantes que considerar, por lo tanto, se parte de la ecuación 5.2 que propone Novaes (2001):

Ecuación 6.2

$$fh = \frac{3,600}{H}$$

Donde fh es la frecuencia por hora y H es el intervalo de paso, sin embargo, para poder incorporar las distintas variaciones de acuerdo con las características distintas de la jornada se propone la siguiente estructura:

Ecuación 6.3

$$F = \left(\sum_{t=1}^K \frac{T_t}{h_t} \right) 5$$

Donde F es la frecuencia semanal (número de viajes realizados durante la semana), T_t es la duración de la franja horaria en segundos, mientras que h_t es el intervalo de paso en esa franja horaria en segundos, K es el total de franjas horarias del día y se multiplica por 5 ya que debido a la disponibilidad de los datos solo se contempla la frecuencia en días laborales que van de lunes a viernes.

Número de estaciones (S)

En la literatura, el indicador más comúnmente utilizado como insumo de infraestructura es la longitud de la línea o longitud del sistema que además expresa su cobertura, por lo que en un inicio se contempló emplear este insumo, sin embargo, de acuerdo con Taboada y Han (2020) este indicador puede ser muy variable cuando se emplea como una aproximación a la inversión en infraestructura, ya que el costo por kilómetro de vía depende de diversos factores como si se hace de manera subterránea, al nivel o elevado, de modo que un indicador más constante es el número de estaciones que además tiene una importante correlación con la longitud de la línea. Este indicador que también fue empleado por Novaes (2001), permite distinguir otro elemento que es de suma importancia como la capacidad de acceso. De igual forma, como se pudo observar en la tabla 2.6, los sistemas mantienen una densidad de infraestructura bastante similar.

Capacidad de la flota (C)

La capacidad de la flota es uno de los elementos señalados por Vuchic (2007) en relación con los insumos de capital, en los estudios de eficiencia de los sistemas ferroviarios urbanos se emplea el número de vagones como una aproximación, sin embargo, es importante señalar que la capacidad de los vagones puede variar dependiendo del tipo de material rodante con el que opera cada sistema, por lo tanto, Taboada y Han (2020) sostienen que un buen indicador puede ser la capacidad de cada línea, esta se entiende como el número de pasajeros en total que la flota asentada en esa línea es capaz de transportar. Otra de las bondades de este indicador es que permite normalizar la capacidad de los sistemas, ya que el Metro de la Ciudad de México opera con material rodante de mayor capacidad en comparación con el Tren Eléctrico Urbano de Guadalajara y el Metrorrey por lo que es más conveniente que emplear número de vagones o de trenes.

Para calcular la capacidad de la flota se tomó en cuenta la configuración usual con la que está estructurado el material rodante en cada línea, el Metro de la Ciudad de México opera desde el 2022 con dos tipos de configuraciones: trenes de 9 y 7 vagones (Sistema de Transporte Colectivo Metro, 2022), los trenes de 9 vagones se encuentran distribuidos de las líneas 1 a la B mientras que el de 7 vagones opera sólo en la línea 12. El tren ligero de Guadalajara opera con configuraciones de trenes dobles de 2 vagones cada uno (4 vagones en total) en las líneas 1 y 2² que otro modelo de tren con configuración simple de 3 vagones opera en la línea 3 (SITEUR, 2025a). El Metrorrey funciona con configuraciones de tres vagones por unidad de transporte (Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey, 2025a). De igual manera, el índice de capacidad corresponde a la capacidad de carga en condiciones de alta capacidad, el cual es la capacidad bajo condiciones regulares de hacinamiento medido en pasajeros (regularmente 6 u 8 dependiendo de los criterios del sistema) sobre metro cuadrado, no debe confundirse con la máxima capacidad operativa de los trenes ni su capacidad promedio. De modo que el cálculo de la capacidad flota se elaboró de la siguiente manera:

² En horas pico la línea 3 opera con configuraciones triples, sin embargo, la conformación permanente es de trenes dobles

Ecuación 6.4

$$C = (C_m \times UT)$$

Donde C es la capacidad de la flota C_m es la capacidad marginal de cada configuración permanente y UT (Unidades de Transporte) es la cantidad de trenes en la configuración permanente.

Es importante señalar que se descartaron otros indicadores como la fuerza laboral e indicadores financieros debido a que estos son administrados por el sistema en su totalidad y difícilmente se puede acceder a la información desagregada, situación que se comprobó al momento de acceder a la información, además, la asignación de estos recursos es altamente variable ya que se organiza de acuerdo con las necesidades cotidianas del sistema completo como señalan Taboada y Han (2020) quienes además sostienen que la frecuencia y el número de estaciones son indicadores altamente correlacionado a este tipo de insumos.

Número de pasajeros

La selección del producto fue relativamente más sencilla que la selección de los insumos, ya que este indicador tiene una presencia casi permanente en la literatura. Se descartaron productos como ingresos o satisfacción del usuario. El primero debido a que los sistemas que se están analizando son de carácter público administrados por organismos gubernamentales descentralizados de modo que no pretenden ser autosostenibles financieramente ya que esto requeriría implementar tarifas más elevadas y afectar la inclusión social del sistema por lo que su forma de financiamiento es a través del recurso estatal, en consecuencia, los ingresos representan sólo una pequeña parte de sus insumos financieros. La satisfacción de los usuarios es un elemento importante para considerar al momento de evaluar los sistemas de transporte público, sin embargo, por las limitaciones temporales de esta investigación no se pudo llevar a cabo la recolección de información de manera desagregada.

Emisiones indirectas de GEI

Una de las recomendaciones que hacen Taboada y Han (2020) es la de incorporar productos no deseados como las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero por consumo eléctrico. Es importante resaltar que los sistemas de transporte público ferroviario urbano que se están analizando son totalmente eléctricos por lo cual no generan emisiones directas de GEI, por lo tanto, una alternativa que permite medir el impacto ambiental son las emisiones indirectas de GEI. En este sentido, en el trabajo de Zhang *et al.* (2022) se emplea como producto no deseado las emisiones indirectas de GEI por consumo eléctrico considerando el factor de emisiones. Este trabajo usa el consumo eléctrico como insumo y las emisiones indirectas como producto no deseado, sin embargo, en el lugar de estudio (China) los factores de emisión son distintos de acuerdo con la región, en México sólo existe un indicador del tipo a nivel nacional, por lo cual, la forma pertinente de tratarlo es como un producto no deseado sin considerar el consumo eléctrico como insumo con la finalidad de evitar redundancia de las variables.

En relación con lo anterior el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2025) del Gobierno de España sugiere que la metodología para medir el impacto ambiental de los sistemas de transporte ferroviario eléctrico es a través de la multiplicación del consumo eléctrico acumulado (generalmente en KWH kilovatios hora) por el factor de emisión que establece la empresa proveedora de energía eléctrica la cual suele estar expresada en KgCO₂eq /KWH, es decir, kilogramos de CO₂ equivalentes (es una manera de condensar los principales GEI) por Kilovatio Hora. Como se puede observar la ecuación a continuación:

$$\text{Ecuación 6.5} \quad \text{Emisiones indirectas de GEI} = (\text{Consumo eléctrico anual en KWH}) \times (\text{Factor de emisión en KgCO}_2\text{eq /KWH})$$

En este caso es el Registro Nacional de Emisiones de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la que publica de manera anual el factor de emisión y lo hace en TonCO₂eq /MWH (Megavatios hora). Para fines prácticos de la investigación se decidió optar por el consumo eléctrico anual total que involucra tracción de trenes, así como alimentación a los

talleres y estaciones debido a que no todos los sistemas analizados contaban con información desagregada sobre su consumo eléctrico.

Una aclaración metodológica importante es que se optó por modelar esta variable como un producto no deseado con el objetivo de preservar congruencia conceptual y metodológica con el objetivo de la investigación ya que la finalidad es la medición de la eficiencia considerando su impacto ambiental y no sus insumos energéticos como un recurso operativo. Adicionalmente, la literatura en DEA, en específico Seiford y Zhu (2002) y Cooper *et al.* (2007) argumentan que cuando el interés se encuentra en el análisis de la incorporación de externalidades negativas del proceso productivo, es metodológicamente más consistente incorporarlos como productos no deseados en lugar de tratarlo como insumos ya que esto podría limitar la representación real del proceso de producción.

Finalmente, es importante señalar que una regla fundamental que garantiza la validez del modelo es que el doble de la suma de los insumos, producto y producto no deseado no sea menor que la cantidad de DMUs (Navarro, 2005), incluso, en enfoques más rigurosos, esta regla indica que no debe ser menor a tres veces la suma de los insumos y productos (Cooper *et al.*, 2007). En este sentido, el modelo se sostiene ya que la suma de los insumos (3), productos (1) y producto no deseado (1) multiplicado por tres da un resultado de 15 y se cuenta con 17 Unidades de Toma de Decisión.

6.5 Técnicas de recolección de datos e instrumentos

La información necesaria para llevar a cabo este modelo se obtuvo principalmente por medio de la Plataforma Nacional de Transparencia a través de diversas solicitudes las cuales pueden ser consultadas en dicha plataforma sólo con ingresar el folio. La información fue condensada y organizada en hojas de cálculo en el programa Excel, mientras que el modelo fue procesado en el software de código abierto Rstudio (2025) empleando la librería y la rutina propuesta por Bolos *et al.* (2018) titulada *deaR*.

En cuestión del Sistema de Transporte Colectivo (Metro) la información se recopiló de las siguientes fuentes:

Tabla 6.4

Fuentes de información sobre el Sistema de Transporte Colectivo (Metro)

Información	Fuente
Número de pasajeros y número de trenes	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Transporte Colectivo Metro (2025) con folio 090173745000990
Intervalos de paso y horarios	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Transporte Colectivo Metro (2025) con folio 090173745000994
Número de estaciones	Sistema de Transporte Colectivo Metro (2025b)
Capacidad de las Unidades de Transporte	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Transporte Colectivo Metro (2025) con folio 0901737450001080
Consumo eléctrico anual	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Transporte Colectivo Metro (2025) con folio 0901737450001248

Fuente: elaboración propia con base en las fuentes consultadas

En cuestión al Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) la información se consiguió de la siguiente manera:

Tabla 6.5

Fuentes de información sobre el Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR)

Información	Fuente
Número de pasajeros y número de trenes	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Tren Eléctrico

	Urbano [SITEUR] (2025) con folio 150278925000117
Intervalos de paso y horarios	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Tren Eléctrico Urbano [SITEUR] (2025) con folio 150278925000118
Número de estaciones	Sistema de Tren Eléctrico Urbano (2025c)
Capacidad de las Unidades de Transporte	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Tren Eléctrico Urbano [SITEUR] (2025) con folio 150278925000136
Consumo eléctrico anual	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Tren Eléctrico Urbano [SITEUR] (2025) con folio 150278925000157

Fuente: elaboración propia con base en las fuentes consultadas

Por último, los medios de acceso a la información sobre el Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey):

Tabla 6.6

Fuentes de información sobre el Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey)

Información	Fuente
Número de pasajeros, número de trenes, intervalos de paso y horarios	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Transporte Colectivo [Metrorrey] (2025) con folio 1911058000055
Capacidad de las Unidades de Transporte, consumo eléctrico anual	Respuesta a solicitud de acceso a la información del Sistema de Transporte Colectivo [Metrorrey] (2025) con folio 1911058000065
Número de estaciones	Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey (2025b)

Fuente: elaboración propia con base en las fuentes consultadas

En relación con el factor de emisión, este fue extraído de los reportes oficiales de la SEMARNAT para los años 2023 y 2024 (Registro Nacional de Emisiones, 2024, 2025).

6.6 Especificación de los modelos DEA

Como se mencionó con anterioridad el *software* empleado para el procesamiento del modelo DEA con sus respectivas especificaciones fue Rstudio el cual es de código abierto. La librería y la rutina empleada fue deaR elaborada por Bolos *et al.* (2018). El primer paso fue la creación de una base de datos tipo DEA, o bien deadata aplicando el comando `make_deadata`. Se especificaron el número de insumos, productos, columna de DMUs y posición del de producto no deseado (solo para el modelo de eficiencia sostenible) `ni = 3, no = 2, dmus = 1, ud_outputs 1`. Los modelos se corrieron bajo el comando `model_basic` con orientación hacia los productos `orientation = "oo"` y con retornos variables y constantes según el modelo `rts = "crs"` y `rts = "vrs"`.

El paquete dicta al *software* resolver el modelo DEA en su forma envolvente y de manera automática se aplica el modelo de dos etapas donde las holguras son maximizadas o bien `maxslack = TRUE` (Bolos *et al.*, 2018). De tal forma que considerando la ecuación 3.21 y las especificaciones al modelo previamente descritas se obtiene la siguiente forma matemática:

Ecuación 6.6

$$Max_{\varphi, \lambda, s^+, s^-} Z_k = \varphi + \varepsilon (Is^+ + Is^-)$$

Sujeto a

$$\lambda Y = \varphi y_k + s^+$$

$$\lambda X = x_k - s^-$$

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j = 1 \text{ (Considerando VRS)}$$

$$\lambda, s^+, s^- \geq 0$$

Desarrollando

Para el producto

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j y_j = \varphi y_k + s^+$$

Para los insumos

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j x_{1j} = x_{1k} - s_1^-$$

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j x_{2j} = x_{2k} - s_2^-$$

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j x_{3j} = x_{3k} - s_3^-$$

Donde

ϕ es el factor de expansión radial del producto

λ_j son las ponderaciones de las unidades de referencia

y_j son la cantidad de pasajeros transportados por la DMU j

x_1 es la capacidad de la flota de la DMU j

x_2 son el número de estaciones de la DMU j

x_3 son las frecuencias semanales planificadas de la DMU j

s^- son las holguras de los insumos

s^+ es la holgura del producto

ε es una constante infinitesimal que garantiza la maximización de holguras en la segunda etapa del modelo

El paquete deaR desarrollado por Bolos *et al.* (2018) emplea un método de transformación de los productos no deseados a partir del aporte hecho por Seiford y Zhu (2002). De modo que con base en de la ecuación 3.28 se entiende que el modelo realizó la transformación:

Ecuación 6.7

$$y_b = -U + \beta$$

Donde

U producto no deseado (emisiones indirectas de GEI por consumo eléctrico) sin transformar.

β constante de traslación.

y_b producto no deseado transformado o bien, emisiones indirectas de GEI por consumo eléctrico transformadas.

A partir de la transformación anterior, el modelo de la eficiencia técnica sostenible considerando una variable ambiental para el producto no deseado se expresa:

Ecuación 6.8

$$Max_{\varphi, \lambda, s^+, s^-} Z_k = \varphi + \varepsilon (Is^+ + Is_b^+ + Is^-)$$

Sujeto a

Para el producto

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j y_j = \varphi y_k + s^+$$

Para el producto no deseado transformado

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j y_{bj} = \varphi y_{bk} + s_b^+$$

Para los insumos

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j x_{1j} = x_{1k} - s_1^-$$

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j x_{2j} = x_{2k} - s_2^-$$

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j x_{3j} = x_{3k} - s_3^-$$

$$\sum_{j=1}^{17} \lambda_j = 1 \text{ (Considerando VRS)}$$

$$\lambda_j, s^+, s_b^+, s_1^-, s_2^-, s_3^- \geq 0$$

6.7 Consideraciones metodológicas y limitaciones

Es importante hacer la aclaración que tanto el Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) así como el Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) no reportaron cambios en los insumos entre 2023 y 2024; por lo tanto, se trabajó con las mismas cantidades para ambos periodos. De igual manera, el Sistema de Transporte Colectivo (Metro) no incluyó las bandas horarias diferenciadas para los intervalos de paso por lo que estas se estimaron a partir de los patrones empleados por Metrorrey y SITEUR. En cuestión de la capacidad de la flota se realizó un estimado a partir de la información recibida, es importante aclarar que SITEUR reportó las capacidades a partir de una medida de 8 pasajeros por metro cuadrado mientras que Metrorrey lo hizo a una capacidad de 6 metros por usuario.

También es importante señalar que durante el periodo estudiado se suscitaron cierres temporales (breves o prolongados) en algunas estaciones de los tres sistemas. Sin embargo, fue una decisión metodológica planificada no realizar el ajuste debido a que se busca capturar problemas de subutilización de la infraestructura que surgen de dichos cierres (ya sea por mantenimiento, reparación o remodelación) y que inciden en la capacidad efectiva de acceso al sistema. Así mismo, se informa que el número de pasajeros fue presentado a partir de los puntos de acceso en las estaciones por lo que no se capturan transbordos o trayectos en múltiples líneas, siempre que el ingreso se haya realizado con un solo pago.

De acuerdo con el paquete desarrollado por Bolos *et al.* (2018) con base en lo argumentado por Seiford y Zhu (2002) el modelo de eficiencia técnica sostenible con producto no deseado requiere de la restricción de VRS, en este sentido, los resultados del modelo de eficiencia técnica sostenible bajo CRS son meramente complementarios y no se toman en consideración para las conclusiones ni la propuesta de políticas públicas. Finalmente se comenta que, dado que los sistemas analizados están conectados al Sistema Eléctrico Nacional y no controlan la mezcla de generación eléctrica, se consideró un factor de emisión homogéneo por año, aplicado de manera uniforme a los tres sistemas, evitando introducir sesgos derivados de supuestas diferencias tecnológicas o regionales en la generación eléctrica.

Capítulo 7

Resultados

7.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo presentar los resultados de los modelos DEA de eficiencia técnica (sin variable ambiental) y de eficiencia técnica sostenible (con variable ambiental) con rendimientos constantes (CRS) y con rendimientos variables (VRS) y su respectivo análisis de referencia (*benchmarking*) y de holguras (*slacks*) para las líneas de transporte público ferroviario urbano de México considerando los años 2023 y 2024. Las puntuaciones de eficiencia se muestran en una escala del 0 al 1 donde 1 son altamente eficientes y 0 totalmente ineficientes.

7.2 Resultados del modelo de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala

A continuación, se muestran los resultados del modelo operativo simple con rendimientos constantes a escala el cual no considera la variable ambiental, aplicado a las 17 líneas de tren urbano analizadas durante los años 2023 y 2024. En los modelos que consideran rendimientos constantes propuesto por Charnes Cooper y Rhode (1978) se toma una frontera de eficiencia lineal y radial partiendo del origen que considera cambios proporcionales en la relación de insumos y productos.

Este tipo de especificaciones metodológicas suelen desfavorecer a las DMU que operan a menor escala ya que asume que todas las unidades de Toma de Decisión podrían expandir o contraer su operación proporcionalmente. Sin embargo, Taboada y Han (2020) consideran adecuados este tipo de rendimientos bajo la justificación de que las líneas de transporte urbano deberían operar bajo

una escala comparable, debido a que forman parte de una red metropolitana las cuales comparten características técnicas y operativas generales.

Tabla 7.1

Resultados del modelo DEA de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS), 2023 y 2024

DMU	2023	2024
CDMXL1	0.81409482	0.61871412
CDMXL2	1	1
CDMXL3	0.9903171	0.92790291
CDMXL4	0.56875766	0.50387265
CDMXL5	0.70154595	0.65634566
CDMXL6	0.58829161	0.53699239
CDMXL7	0.67974753	0.69147847
CDMXL8	0.86816129	0.81924036
CDMXL9	0.96389174	0.75984474
CDMXLA	0.91406183	0.81061735
CDMXLB	0.78650962	0.73932002
CDMXL12	0.28906967	0.63447277
GDLL1	0.9931513	0.86265115
GDLL2	1	0.95494584
GDLL3	1	1
MTYL1	0.76722128	0.75216398
MTYL23	0.78718982	1

Fuente: elaboración propia empleando Rstudio (2025)

De manera general, los resultados muestran niveles contrastantes de eficiencia técnica operacional mostrando diferencias entre los sistemas, los cuales, de manera adicional, mostraron resultados diversos de manera interna y temporal. Las líneas que lograron eficiencia plena durante 2023 y 2024 fueron la línea 2 (Cuatro caminos - Tasqueña) del STC (Metro) y la línea 3 (Arcos Zapopan – Central Camionera) del SITEUR. Por otra parte, la línea que mostró eficiencia plena únicamente durante 2023 fue la línea 2 (Tetlán - Juárez) del SITEUR, mientras que la línea 2-3 (Sendero – Hospital Metropolitano) del Sistema Transporte Colectivo (Metrorrey) fue eficiente durante el 2024. El resto de las líneas muestran ineficiencias relativas durante los años analizados.

Para el Sistema de Transporte Colectivo (Metro) los puntajes se encuentran entre 0.28 y 0.99 en 2023 y 0.50 y 0.95 para 2024, lo que muestra cambios importantes entre los años y sistemas estudiados. Esto retrata cambios importantes en los productos generados, así como la relación de los insumos para cada una de las DMUs analizadas.

El Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) muestra una mayor heterogeneidad, para el año 2023 existe un rango del 0.78 al 0.76 mientras que para el año 2024 este es de 0.75 a 1. Lo cual demuestra que existió un mayor control operativo durante el año 2024, en contraste, el SITEUR mantuvo un desempeño de manera más homogénea durante el año 2023, el cual se mantuvo en un rango de 0.99 a 1, mientras que en el año 2024 este fue de 0.86 a 1 lo que demuestra mayor variabilidad en el manejo de los insumos en relación con la demanda atendida.

De manera particular, el STC (Metro), durante el año 2023 la línea 3 (Indios verdes – Universidad), la línea 9 (Pantitlán -Tacubaya) y la línea A (Pantitlán - La paz) fueron las líneas con menor ineficiencia relativa con puntajes de 0.99, 0.96 y 0.91 respectivamente. Por otro lado, la línea 12 (Tláhuac –Mixcoac), la línea 4 (Santa Anita - Martín Carrera) y la línea 6 (El rosario - Martín Carrera) son las que presentan mayores niveles de ineficiencia relativa con puntajes de 0.28, 0.56 y 0.58 respectivamente.

Durante el año 2024 en el STC (Metro) las líneas mejor evaluadas por debajo de la eficiencia total fueron: la línea 3, la línea 8 (Garibaldi - Constitución de 1917) y la línea A con puntajes de 0.92, 0.819 y 0.81 respectivamente. En el caso contrario, las líneas peor evaluadas durante este año fueron la línea 4, la línea 6 y la línea 1 (Pantitlán - Observatorio) con puntajes respectivos de 0.5, 0.53 y 0.61.

Dentro del sistema SITEUR, durante el año 2023 todas las líneas mostraron niveles altos de eficiencia siendo la línea 1 (Auditorio - Periférico sur) la única que muestra una mínima ineficiencia relativa con un puntaje de 0.99. Sin embargo, el desempeño analizado durante el año 2024 muestra resultados distintos, pues la línea 2 tuvo un puntaje de 0.95, mientras que la línea 1 disminuyó de forma significativa su desempeño, alcanzando un puntaje de 0.86.

Tratándose del Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey), para el año 2023 la línea 1 (Talleres - Exposición) obtuvo un puntaje ligeramente inferior a la línea 2-3, 0.76 y 0.78 respectivamente. La línea 1 mantuvo ineficiencia relativa durante el año 2024, con un puntaje de 0.75, lo que evidencia una mejora en la línea 2-3 pero un peor desempeño en la línea 1 con respecto a los años analizados.

Con respecto a los comportamientos de interés entre año 2023 y 2024 del Sistema de Transporte Colectivo (Metro) resalta el cambio en el desempeño de la línea 12 la cual pasó de un puntaje de 0.28 en 2023 a 0.63 en 2024 lo cual muestra una mejora significativa. En el caso opuesto, se encuentra la línea 1 la cual pasó de un nivel de desempeño de 0.81 en 2023 a 0.61 en 2024, lo que indica un decrecimiento de 0.20 puntos. Un comportamiento similar mostró la línea 9 la cual pasó de 0.91 puntos en 2023 a decaer de manera importante en 2024 con 0.75 puntos.

7.2.1 Referencias *benchmarking* modelo de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS)

A continuación, se presentan los resultados del análisis *benchmarking* del modelo de eficiencia técnica (sin variable ambiental) con rendimientos constantes a escala, el cual permite distinguir las líneas que se encuentran sobre la frontera de eficiencia y son tomadas como referencia para las líneas ineficientes debido a que cuentan con una capacidad productiva similar (Zhu, 2009).

El número que aparece a continuación de cada línea de referencia establece el grado de ponderación (λ) que se asignó en el modelo con la finalidad de construir la combinación contra la cual se evaluó cada línea ineficiente. Las líneas eficientes son tomadas a ellas mismas como única referencia al encontrarse sobre la frontera de eficiencia.

Tabla 7.2

Benchmarking del modelo DEA de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS) 2023 – 2024

	2023	2024
CDMXL1	CDMXL2 (0.14), GDLL2 (0.79), GDLL3 (0.5)	CDMXL2 (0.34), GDLL3 (0.68)
CDMXL2	CDMXL2 (1)	CDMXL2 (1)
CDMXL3	CDMXL2 (0.87)	CDMXL2 (0.87)
CDMXL4	CDMXL2 (0.12), GDLL2 (0.68)	CDMXL2 (0.13), GDLL3 (0.4)
CDMXL5	CDMXL2 (0.36), GDLL2 (0.42)	CDMXL2 (0.36), GDLL3 (0.24)
CDMXL6	CDMXL2 (0.27), GDLL2 (0.44)	CDMXL2 (0.27), GDLL3 (0.25)
CDMXL7	CDMXL2 (0.58)	CDMXL2 (0.58)
CDMXL8	CDMXL2 (0.71), GDLL2 (0.18)	CDMXL2 (0.67), GDLL3 (0.16)
CDMXL9	CDMXL2 (0.5)	CDMXL2 (0.5)
CDMXLA	CDMXL2 (0.41)	CDMXL2 (0.41)
CDMXLB	CDMXL2 (0.8), GDLL3 (0.08)	CDMXL2 (0.81)
CDMXL12	CDMXL2 (0.8), GDLL3 (0.08)	CDMXL2 (0.77)
GDLL1	CDMXL2 (0.07), GDLL3 (0.58)	CDMXL2 (0.05), GDLL3 (0.043), MTYL23 (0.803)
GDLL2	GDLL2 (1)	CDMXL2 (0.006), GDLL3 (0.578)
GDLL3	GDLL3 (1)	GDLL3 (1)
MTYL1	CDMXL2 (0.06), GDLL3 (0.77)	CDMXL2 (0.05), GDLL3 (0.44), MTYL23 (0.47)
MTYL23	CDMXL2 (0.02), GDLL3 (0.66)	MTYL23 (1)

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Con respecto a las líneas explicadas a mayor profundidad en el apartado anterior, se puede distinguir que la línea 1 del STC (Metro) el modelo consideró como referencias para el año 2023 a la línea 2 del STC (Metro) y las líneas 2 y 3 del SITEUR con niveles de ponderación de 0.14, 0.79 y 0.5 respectivamente. Mientras que en el año 2024 únicamente considero a las líneas 2 del STC (Metro) y a la línea 3 del SITEUR con ponderaciones respectivas de 0.34 y 0.68 incrementando el nivel de ponderación en ambas líneas con respecto al año anterior al descartar la línea 2 del SITEUR ya que en 2024 tuvo ineficiencia relativa en este modelo.

Considerando el caso particular de la línea 12 del STC (Metro) en el año 2023 se tomaron como referencia la línea 2 del STC (Metro) y en considerablemente menor medida la línea 3 del SITEUR con ponderaciones de 0.8 y 0.08 respectivamente. Por otro lado, en el año de 2024 únicamente se

consideró a la línea 2 del STC (Metro) con una ponderación de 0.77 lo que retrata una mayor estabilidad hacia esta línea como referencia.

En relación con el SITEUR, en el año 2023, la línea 1 consideró como referencias a la línea 2 del STC (Metro) con una ponderación de 0.07 y a la línea 3 del SITEUR con una ponderación de 0.58. Mientras que, en el 2024, esta misma línea consideró las mismas referencias del año anterior, pero con la aparición de la línea 2-3 del (Metrorrey) con una alta ponderación de 0.8. En este mismo año, la línea 2 del SITEUR al resultar con ineficiencia relativa, tomó como referencia a la línea 2 del STC (Metro) con 0.06 de ponderación y a la línea 3 de su mismo sistema con 0.57 de ponderación.

En 2023, la línea 1 del STC (Metrorrey) el modelo mostró como referencia las líneas 2 del STC (Metro) y la línea 3 del SITEUR con una ponderación de 0.06 y 0.77 respectivamente. Mientras que la línea 2-3 del STC (Metrorrey) consideró como similares las líneas 2 del STC (Metro) y la línea 3 del SITEUR con una ponderación de 0.02 y 0.66 respectivamente. Para el año 2024 la línea 1 del STC (Metrorrey) tomó como referencia a las mismas líneas que en el año antecesor agregando con alta similitud a la línea 2-3 del mismo sistema con ponderaciones respectivas de 0.05, 0.44 y 0.47.

En términos generales, durante el año 2023 la línea eficiente que tuvo mayor frecuencia fue la línea 2 del STC (Metro) apareciendo como referencia en diferentes ponderaciones en todas las líneas ineficientes, manteniendo una mayor ponderación general dentro del STC (Metro). Por otro lado, las líneas 2 y 3 del SITEUR aparecieron en la misma proporción, en las líneas en relación con el STC (Metro) la línea 2 del SITEUR tuvo las ponderaciones más altas, mientras que en la línea 1 del SITEUR y en las del STC (Metrorrey) hubo solo la presencia de la línea 3 del SITEUR como referencia.

7.2.2 Análisis de holguras (*slacks*) modelo de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS).

A continuación, se presentan los resultados del análisis de holguras (*slacks*) del modelo de eficiencia técnica (sin variable ambiental) con rendimientos constantes a escala para los años que

se están analizando. Como se mencionó en el apartado teórico-metodológico, las holguras cuantifican qué tanto existe una subutilización potencial de los insumos de una DMU, es decir, cuánto tendrían que reducir sus insumos para generar la misma cantidad de productos, así como el incremento potencial de los insumos para alcanzar la eficiencia dados los insumos con los que se opera (Zamora, 2018). Es importante resaltar que los ajustes que se presentan a continuación son de carácter indicativo dada la naturaleza metodológica (no paramétrica) del modelo y se deben emplear con cautela para recomendaciones operativas directas.

Los resultados son mostrados en la tabla 7.3, los insumos fueron abreviados de la siguiente manera: Cap para capacidad de la flota, Est para el número de estaciones, Fre para las frecuencias semanales planificadas y Pas para el número de pasajeros transportados durante el año.

Tabla 7.3

Análisis de holguras (slacks) del modelo de eficiencia técnica con rendimientos constantes a escala (CRS) 2023-2024

DMU	2023				2024			
	Cap	Est	Fre	Pas	Cap	Est	Fre	Pas
CDMXL1	0	0	0	0	67	0	0	0
CDMXL2	0	0	0	0		0		0
CDMXL3	8032	0	585	0	15683	0	531	0
CDMXL4	0	0	0	0		0	302	0
CDMXL5	0	0	154	0		0	324	0
CDMXL6	0	0	305	0		0	488	0
CDMXL7	3315	0	174	0	4845	0	59	0
CDMXL8	0	0	174	0		0	256	0
CDMXL9	12240	0	1276	0	13770	0	1245	0
CDMXLA	2805	0	562	0	2805	0	537	0
CDMXLB	0	0	0	0	192	1	0	0
CDMXL12	22147	1	0	0	18823	1	0	0
GDLL1	0	7	0	0	0	0	0	0
GDLL2	0	0	0	0	0	0	450	0
GDLL3	0	0	0	0	0	0	0	0
MTYL1	0	4	0	0	0	0	0	0
MTYL23	0	9	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

En relación con la capacidad de la flota, en 2023 las líneas que muestran una subutilización destacada de este insumo son la línea 3, 7, 9, A, y 12 del STC (Metro). Mientras que durante el año 2024 aparecen con esta característica las líneas 1, 3, 7, 9, A, B y 12, lo cual demuestra un menor aprovechamiento de este insumo con respecto al año anterior. Cabe resaltar que en relación con este insumo no aparecen con excedentes destacables ninguna de las líneas del SITEUR ni del STC (Metrorrey).

En cuestión del número de estaciones, en 2023 las líneas que muestran una subutilización de este insumo son la línea 12 del STC (Metro), la línea 1 del SITEUR y las líneas 1 y 2-3 del STC (Metrorrey). Por otra parte, durante el año 2024 únicamente aparecen con excedente en estaciones la línea 12 y B del STC (Metro), esto habla de un mejor aprovechamiento general de la infraestructura fija y de acceso a los sistemas.

El insumo que mantuvo un aprovechamiento más heterogéneo fueron las frecuencias semanales planificadas, durante 2023 las líneas que presentaron excedentes en relación con este insumo fueron la línea 3, 5, 6, 7, 8, 9 y A del STC (Metro). Con respecto al año 2024, son estas mismas líneas las que demuestran un excedente de este insumo, así como la línea 4 del STC (Metro) y la línea 2 del SITEUR.

En cuestión al producto único considerado en el modelo el cual es número de pasajeros no se presentaron holguras, de modo que los casos de ineficiencia podrían ser causados por los excedentes en los insumos anteriormente indicados.

7.3 Resultados del modelo de eficiencia técnica rendimientos variables a escala (VRS)

En este apartado se presentan los resultados del modelo DEA de eficiencia técnica (sin variable ambiental) con rendimientos variables a escala (VRS). Se contemplaron los mismos insumos y productos que en el modelo CRS, de igual manera, se incluyeron las 12 líneas del Sistema de Transporte Colectivo (Metro), las 3 líneas del SITEUR y las líneas 1 y 2.3 del Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) para los años 2023 y 2024. Como se señaló en el capítulo teórico-metodológico los modelos DEA que emplean rendimientos variables a escala consideran

una frontera de eficiencia más flexible (Banker *et al.*, 1984), lo cual permite adecuar los resultados de acuerdo con la capacidad operativa de cada DMU. Estos modelos permiten que las DMU con baja capacidad productiva no sean penalizadas injustificadamente al ser comparadas con las de mayor capacidad. Este tipo de modelo a nivel línea o ruta fue empleado por Delfín y Melo (2017).

Tabla 7.4

Resultados del modelo DEA de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS), 2023 y 2024

DMU	2023	2024
CDMXL1	0.837885	0.62208501
CDMXL2	1	1
CDMXL3	0.99545196	0.94618776
CDMXL4	1	1
CDMXL5	0.75988913	0.74980788
CDMXL6	0.65327144	0.64157036
CDMXL7	0.859083	0.98713666
CDMXL8	0.88245884	0.83089756
CDMXL9	1	0.87871088
CDMXLA	1	1
CDMXLB	0.83223917	0.79596423
CDMXL12	0.31998367	0.70497156
GDLL1	1	1
GDLL2	1	1
GDLL3	1	1
MTYL1	0.76933689	0.76976375
MTYL23	1	1

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Como es posible observar en la tabla 7.3 el modelo DEA con rendimientos variables logra mejorar la eficiencia de las líneas analizadas de modo que todas las líneas del SITEUR resultan completamente eficientes en 2023 y 2024. De igual manera en 2023, las líneas 2, 4, 9 y A del STC (Metro) se muestran eficientes. A excepción de la línea 9, las líneas anteriormente descritas mantuvieron eficiencia en 2024. En el caso particular del STC (Metrorrey) la línea 2-3 en 2023 y 2024 se muestra en eficiente.

En relación con el STC (Metro), durante 2023 se observa un rango de eficiencia de 0.31 a 1, mientras que en 2024 es de 0.62 a 1. Las líneas 1 y 12 muestran niveles de ineficiencia relativa capturando caída y mejora en los años analizados, durante 2023 es la línea 12 con la puntuación más baja, en 2024 la línea 1 ocupa este lugar. Las líneas 5 y 6 del STC (Metro) muestran puntuaciones bajas en comparación con el resto y son constantes en el periodo estudiado. El mismo caso ocurre con la línea 1 del STC (Metrorrey) que muestra niveles considerables de ineficiencia relativa en ambos años incluso considerando rendimientos variables.

Por otra parte, las líneas que durante 2023 mostraron resultados de baja y media ineficiencia relativa (puntuaciones de 0.76 a 0.99) son la línea 1, 3, 7, 8 y B del STC (Metro). Durante el año 2024 estas mismas líneas estuvieron en el mismo rango de nivel de eficiencia añadiéndose la línea 9 la cual fue eficiente totalmente en 2023 pero con una puntuación de 0.87 en 2024 lo que retrata una caída en su nivel de desempeño.

7.3.1 Referencias *benchmarking* del modelo de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS)

En la siguiente tabla se muestra el análisis *benchmarking* extraído del modelo DEA de eficiencia técnica (sin variable ambiental) considerando rendimientos variables a escala. Así como se mencionó con anterioridad este análisis funciona para identificar líneas eficientes que el modelo considero como similares que funcionaron para emular con respecto a las líneas ineficientes.

Tabla 7.5

Benchmarking del modelo DEA de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS) 2023 – 2024

	2023	2024
CDMXL1	CDMXL2 (0.17), GDLL3 (0.82)	CDMXL2 (0.35), GDLL3 (0.64)
CDMXL2	CDMXL2 (1)	CDMXL2 (1)
CDMXL3	CDMXL2 (0.75), CDMXL9 (0.25)	CDMXL2 (0.78), CDMXLA (0.21)
CDMXL4	CDMXL4 (1)	CDMXL4 (1)
CDMXL5	CDMXL2 (0.18), CDMXLA (0.37), GDLL2 (0.39)	CDMXL2 (0.21) CDMXLA (0.24), GDLL2 (0.54)
CDMXL6	CDMXL2 (0.07), CDMXLA (0.41), GDLL2 (0.515)	CDMXL2 (0.07), CDMXLA (0.41), GDLL2 (0.51)

CDMXL7	CDMXL2 (0.17), CDMXLA (0.65), GDLL1 (0.17)	CDMXL2 (0.28), CDMXLA (0.10), GDLL2 (0.61)
CDMXL8	CDMXL2 (0.64), CDMXLA (0.14), GDLL2 (0.21)	CDMXL2 (0.64), CDMXLA (0.063), GDLL2 (0.29)
CDMXL9	CDMXL9 (1)	CDMXL2 (0.14), CDMXLA (0.85)
CDMXLA	CDMXLA (1)	CDMXLA (1)
CDMXLB	CDMXL2 (0.69), CDMXLA (0.16), GDLL1 (0.14)	CDMXL2 (0.7), GDLL2 (0.12), GDLL3 (0.17)
CDMXL12	CDMXL2 (0.59), CDMXLA (0.22), GDLL1 (0.17)	CDMXL2 (0.63), GDLL2 (0.20), GDLL3 (0.16)
GDLL1	GDLL1 (1)	GDLL1 (1)
GDLL2	GDLL2 (1)	GDLL2 (1)
GDLL3	GDLL3 (1)	GDLL3 (1)
MTYL1	CDMXL2 (0.03), GDLL1 (0.47), GDLL3 (0.49)	CDMXL2 (0.04), GDLL1 (0.19), GDLL3 (0.43), MTYL23 (0.32)
MTYL23	MTYL23 (1)	MTYL23 (1)

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025).

Como es posible apreciar en la tabla 7.5 en 2023 y 2024 la línea que es utilizada como referencia de manera más frecuente es la línea 2 del STC (Metro), la cual en 2023 tiene las ponderaciones más altas con la línea 3, B, 8 y 12 de 0.75, 0.69, 0.64 y 0.59 respectivamente, patrón que se repite en 2024 pero con ponderaciones de 0.78, 0.7, 0.64 y 0.63 lo que expresa que las líneas 3 y 12 incrementaron su similitud a la línea 2.

Por otro lado, en este modelo, la línea A del STC (Metro) es frecuentemente referenciada. En 2023, la línea que mantuvo una mayor similitud fue la 7 del STC (Metro) con una ponderación de 0.65, le siguen las líneas 6, 5, 12, B y 8 con similitudes ponderadas en 0.41, 0.37, 0.22, 0.16 y 0.14. Sin embargo, en 2024 las lambdas muestran patrones distintos, siendo la línea 9 a la que se le consideró mayor referencia con respecto a la línea A con una ponderación de 0.85, le siguen la línea 6, 5, 3 y 7 con similitudes de 0.41, 0.24, 0.21 y 0.1.

En relación con el SITEUR la línea 2 es la línea de este sistema mayormente empleada como referencia durante 2023 mostrando similitud con las líneas 6, 5 y 8 del STC (Metro) con una ponderación de 0.51, 0.39 y 0.21. Para 2024 se suman la línea 7, la línea B y la línea 12 esta primera con una mayor ponderación de 0.61, mientras que las líneas 5, 6, 8, 12 y B tienen una emulación de 0.54, 0.51, 0.29, 0.20 y 0.12.

La línea 3 del SITEUR es también una de las líneas eficientes con mayor peso en el análisis *benchmarking*. Para 2023 fue emulada por la línea 3 del STC (Metro) y la línea 1 del STC (Metrorrey) con ponderaciones de 0.82 y 0.49 respectivamente, mientras que en el año 2024 mantuvo referencia con estas mismas líneas añadiendo la línea 12 del STC (Metro) con una ponderación de 0.17, mientras que para la línea 1 del STC (Metro) fue de 0.64 y 0.43 para la línea 1 del STC (Metrorrey).

En el caso de la línea 1 del SITEUR fue más frecuentemente referenciada durante el 2023, pero con menores ponderaciones, esta línea es emulada en el STC (Metro) por la línea B y 12 por 0.17 y la línea B con 0.14 y es referencia por la línea por la línea 1 del STC (Metrorrey) por 0.47. En 2024 esta línea fue emulada únicamente por la línea 1 del STC (Metrorrey) por 0.19.

7.3.2 Análisis de holguras (*slacks*) del modelo de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS)

Como se explicó con anterioridad el análisis de holguras es útil para identificar los insumos y productos en los que las líneas tienen excesos y deficiencias que no les permiten alcanzar la eficiencia total. En la tabla 7.6 es posible observar lo anterior, es importante resaltar que los insumos y productos fueron abreviados, Cap para capacidad, Est para número de estaciones, Fre para frecuencias semanales planificadas y Pas para el número de pasajeros transportados durante el año. Se vuelve a puntualizar que estos valores son de carácter indicativo más no establecen medidas directas de ajustes en las operaciones.

Tabla 7.6

*Análisis de holguras (*slacks*) del modelo de eficiencia técnica con rendimientos variables a escala (VRS)*

	2023				2024			
DMU	Cap	Est	Fre	Pas	Cap	Est	Fre	Pas
CDMXL1	0	2	428	0	0	0	87	0
CDMXL2	0	0	0	0	0	0	0	0
CDMXL3	4971	0	266	0	1582	0	417	0
CDMXL4	0	0	0	0	0	0	0	0

CDMXL5	0	0	0	0	15082	0	0	0
CDMXL6	0	0	71	0	0	0	66	0
CDMXL7	6944	0	0	0	14218	0	0	0
CDMXL8	0	0	91	0	0	0	95	0
CDMXL9	0	0	0	0	11365	0	785	0
CDMXLA	0	0	0	0	0	0	0	0
CDMXLB	1611	0	0	0	4027	0	0	0
CDMXL12	25490	0	0	0	23786	0	0	0
GDLL1	0	0	0	0	0	0	0	0
GDLL2	0	0	0	0	0	0	0	0
GDLL3	0	0	0	0	0	0	0	0
MTYL1	0	1	0	0	0	0	0	0
MTYL23	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Como es posible observar en la tabla 7.6 los insumos en los que la mayor cantidad de líneas presentaron holguras son la capacidad de la flota, así como las frecuencias semanales planificadas. En relación con la capacidad de la flota, durante 2023 las líneas que mostraron subutilización de este insumo fueron la línea 3, 7, B y 12 del STC (Metro) sin embargo, de manera general, existió una mayor subutilización de este insumo durante 2024, contemplando las líneas anteriores, así como las líneas 5 y 9 del STC (Metro). Tanto el SITEUR como el STC (Metrorrey) no mostraron problemas significativos de exceso en la capacidad de la flota.

Durante 2023 cuatro líneas resultaron con excesos en las frecuencias semanales planificadas las cuales fueron 1, 3, 6, y 8 del STC (Metro). Así como la capacidad de la flota, se presentaron mayores problemas de subutilización de este insumo durante 2024 siendo cinco líneas con holguras: 1, 3, 6, 8 y 9 del STC (Metro). De igual forma que la capacidad de la flota, el SITEUR y el STC (Metrorrey) no mostraron indicios de subutilización en relación con las frecuencias semanales programadas.

Con respecto al número de estaciones, únicamente durante el año 2023 se presentaron problemas evidentes de subutilización con respecto al análisis de holguras, siendo la línea 1 del STC (Metro) y la línea 1 del STC (Metrorrey). Durante 2024 no se muestran holguras evidentes en este insumo. El mismo caso sucede con el único producto considerado en este modelo que es el número de pasajeros para el cual ninguna línea en ninguno de los dos años resultó con holguras evidentes.

7.4 Resultados de la eficiencia de escala del modelo de eficiencia técnica

La eficiencia a escala como se explicó en el capítulo teórico-metodológico resulta del cociente entre el puntaje de eficiencia considerando rendimientos constantes sobre el puntaje obtenido bajo rendimientos variables (Thanassoulis, 2001). Este nuevo puntaje otorga más información sobre el desempeño general de las líneas en relación con su escala óptima de operación donde, al igual que las eficiencias anteriormente mostradas, se evalúa con un puntaje del 0 al 1 siendo 1 operación en la escala óptima. Esto puede verse en la tabla 7.7 para todas las líneas estudiadas durante el 2023 y 2024.

Tabla 7.7

Resultado de la eficiencia a escala del modelo de eficiencia técnica 2023-2024

	2023	2024
CDMXL1	0.97160687	0.9945813
CDMXL2	1	1
CDMXL3	0.99484168	0.98067524
CDMXL4	0.56875766	0.50387265
CDMXL5	0.92322147	0.87535178
CDMXL6	0.90053165	0.83699689
CDMXL7	0.7912478	0.7004891
CDMXL8	0.98379805	0.98597035
CDMXL9	0.96389174	0.86472668
CDMXLA	0.91406183	0.81061735
CDMXLB	0.9450524	0.92883574
CDMXL12	0.90338882	0.89999768
GDLL1	0.9931513	0.86265115
GDLL2	1	0.95494584
GDLL3	1	1
MTYL1	0.99725008	0.97713614
MTYL23	0.78718982	1

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Como se puede observar en la tabla 7.7 las líneas con los mejores índices de eficiencia a escala en 2023 y 2024 son la línea 2 del STC (Metro), así como la línea 3 del SITEUR. Por otro lado, la línea 2 del SITEUR fue eficiente en escala únicamente durante 2023, caso contrario, la línea 2-3 del STC (Metrorrey) la cual fue únicamente eficiente durante el 2024.

Las líneas con la eficiencia a escala más baja durante 2023 son la línea 7 del STC (Metro) con una puntuación de 0.79, le sigue la línea 2-3 del STC (Metrorrey) con un puntaje de 0.78, mientras que la línea menos eficiente a escala es la línea 4 con un puntaje de 0.56. Para 2024 las líneas con menor eficiencia son la línea 4 del STC (Metro) con un puntaje de 0.50 similar al del año predecesor, un caso similar es la línea 7 del mismo sistema con un puntaje de 0.70.

Los rangos de ineficiencia a escala se encuentran entre 0.56 a 0.99 para el STC (Metro) en 2023, mientras que en este mismo sistema en 2024 el rango fue de 0.50 a 0.99. Para el SITEUR el rango en 2023 fue de 0.99 ya que sólo la línea 1 mostró una ligera ineficiencia, situación que cambió en 2024 fue de 0.86 a 0.95 ya que la línea 2 de este sistema mostró ineficiencia a escala. En caso del STC (Metrorrey) el rango de ineficiencia para 2023 fue de 0.78 a 0.99 siendo la línea 2-3 la que mostró mayor ineficiencia a escala, situación -que al contrario del SITEUR- mejora en 2024 donde el rango de ineficiencia fue de 0.97 con presencia únicamente de la línea 1.

7.5 Síntesis y discusión de los modelos de eficiencia técnica

La finalidad de este apartado es generar una síntesis y discusión que permita establecer una convergencia entre los modelos DEA elaborados para las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario estudiados considerando sus resultados sin la introducción de una variable ambiental. El principal objetivo de este análisis es identificar patrones generales de desempeño que permitan distinguir problemas asociados a la gestión y operación de la línea, problemas de escala, así como aquellos vinculados a desequilibrios en el uso de los insumos y productos generados.

El punto de partida del análisis se centra en los resultados del modelo que considera rendimientos variables a escala VRS los cuales de manera complementaria son contrastados con los resultados del modelo que considera rendimientos constantes a escala CRS los cuales en conjunto permiten identificar la eficiencia a escala (Thanassoulis, 2001). Los niveles de desempeño identificados son vinculados con los conjuntos de referencia, así como con las holguras. Esta estructura analítica permite interpretar de manera adecuada los cambios interanuales observados, diferencias

estructurales entre las Unidades de Toma de Decisión con un acercamiento al contexto operativo sin establecer relaciones causales estrictas.

De acuerdo con la información de la tabla 7.4 bajo rendimientos variables a escala es posible distinguir que los sistemas analizados mantienen comportamientos heterogéneos entre sí. El SITEUR muestra un comportamiento más homogéneo dado que todas sus líneas logran la eficiencia total. En el caso del STC (Metrorrey) de las dos líneas analizadas sólo la línea 2-3 mantiene la eficiencia total, lo que indica que la línea 1 tiene un desempeño ineficiente. El caso del STC (Metro) es más complejo, pues mientras hay líneas que alcanzaron la eficiencia total, otras presentan ineficiencias importantes y persistentes.

Es importante distinguir que las líneas 1 y 9 del STC (Metro) tuvieron caídas importantes entre 2023 y 2024, caso contrario las líneas 12 y 7 presentaron mejoras importantes entre los años estudiados. Fue posible identificar que con relación a las líneas 1 y 12 existen fenómenos exógenos que podrían estar vinculados a estos comportamientos. Mientras que la línea 7 y 9 presentan una situación más compleja.

En el caso de la línea 1 hubo cierres de estaciones entre 2022 y 2024 debido a tareas de remodelación, estas obras fueron programadas para terminar en 2023, sin embargo, fueron concluidas hasta 2025 (Arana, 2025), el retraso en la reapertura total coincide con lo retratado por el modelo en torno del decaimiento de la eficiencia de la línea.

En relación con la línea 12 en 2024 se logró el restablecimiento total del servicio (Gobierno de la Ciudad de México, 2024b) el cual estaba afectado debido al cierre de las estaciones y tramos que se encontraban en reparación y mantenimiento producto del incidente de 2021 lo que generó un incremento en la demanda.

Las líneas que mostraron un desempeño bajo y persistente entre el periodo estudiado son la línea 5, 6 y B del STC (Metro) así como la línea 1 del STC (Metrorrey). En el caso contrario las líneas 2, 4 y A del STC (Metro), todas las líneas del SITEUR y la línea 2-3 del STC (Metrorrey) tienen eficiencia técnica pura en ambos años, la línea 9 sólo en 2023.

En torno a los desequilibrios de los insumos (véase tabla 7.6) se puede partir del análisis de holguras, el insumo que es más frecuentemente subutilizado por las Unidades de Toma de Decisión son las frecuencias semanales planificadas, seguido de la capacidad de la flota, existe en menor medida una subutilización de las estaciones, esto retrata que la eficiencia observada es relativa y que pueden presentarse márgenes de mejora, tal es el caso de la línea 3 la cual tiene niveles altos de eficiencia pero presenta un número importante de holguras.

Las líneas que presentan eficiencia técnica pura apuntan a un uso adecuado de sus recursos dado su tamaño de operación, sin embargo, para establecer condiciones de desempeño integral es importante revisar sus resultados en relación con su frecuencia de emulación y descartar ineficiencias a escala. En función al primer aspecto es importante referirse a la tabla 7.5 en la cual es posible destacar que las líneas 2 y A del STC (Metro) son frecuentemente referenciadas, así como todas las líneas del SITEUR, esto puede evidenciar líneas con un desempeño óptimo integral sobre las líneas que sólo mantienen eficiencia técnica pura, para ello es importante examinar el modelo con rendimientos constantes a escala CRS.

Si bien, las líneas 4, 9 y A del STC (Metro), la línea 1 SITEUR y la línea 2-3 del STC (Metrorrey) presentaron eficiencia técnica pura durante 2023 y 2024 (o sólo durante 2023) con base en la tabla 7.4 estas mostraron ineficiencias en el modelo con rendimientos constantes a escala (la línea 2 del SITEIRUR solo durante 2024 y la línea 2-3 del Metrorrey sólo durante 2023), lo cual revela problemas con el tamaño o capacidad general de operación de estas líneas. De acuerdo con la tabla 7.7 las líneas con eficiencia técnica pura que tienen las mayores ineficiencias de escala son la línea 4 del STC (Metro) en 2024 y 2023 y la línea 2-3 STC (Metrorrey) en 2023.

El caso de la línea 2-3 del STC (Metrorrey) puede vincularse con un fenómeno contextual, pues de agosto a noviembre 2023 se presentó el cierre de diversas estaciones con la finalidad de realizar obras de mantenimiento y reparación (Gobierno de Nuevo León, 2023), este fenómeno puede estar asociado a la baja eficiencia a escala lo cual apunta a que en las líneas que pertenecen a sistemas más pequeños los cierres temporales tienden a manifestarse en este tipo de ineficiencia. El contraste en la línea 12 del STC (metro) y 2-3 de monterrey sugiere que los choques temporales o

los fenómenos contextuales se retratan de manera distinta de acuerdo con el tamaño del sistema al que pertenecen y su madurez operativa.

Por otra parte, las líneas con el mejor desempeño integral considerando únicamente productos operativos (sin variable ambiental) son las líneas 2 del STC (Metro) y la línea 3 del SITEUR, estas líneas demostraron mantener eficiencia técnica pura en los dos años analizados, de igual manera fueron frecuentemente referenciadas y con ponderaciones altas en determinados casos y además fueron totalmente eficientes a escala.

Resulta relevante revisar los casos de las líneas que presentaron importantes ineficiencias técnicas puras y que no presentan problemas significativos a escala. Entre ellas se encuentra la línea 6 la cual emuló a la línea A del STC (Metro) así como a la línea 2 del SITEUR. Se puede inferir que su ineficiencia técnica pura se encuentra asociada a la baja cantidad de pasajeros transportados ya que con menos de la mitad de la capacidad de la flota la línea 2 del SITEUR logró transportar una cantidad cercana de pasajeros y con una frecuencia similar la línea A logró movilizar casi el doble de personas, comportamiento que se manifestó durante 2023 y 2024.

Otra de las líneas con constantes problemas de ineficiencia técnica pura es la línea 5 del STC (Metro), la cual mostró un comportamiento similar que la línea 6 del mismo sistema, la línea 5 también referencia el comportamiento de las líneas A del STC (Metro) y a la línea 2 del SITEUR, si bien logró transportar más pasajeros que la línea 6 no lo hizo en una proporción eficiente con respecto a las líneas que emula, ya que requirió poco más del doble de capacidad de flota para transportar el doble de pasajeros que la línea 2 del SITEUR y a su vez la línea A del STC (Metro) consiguió atender una demanda considerablemente mayor con un poco más de frecuencias que la línea 5 lo cual es consistente con sus puntuaciones de eficiencia técnica pura.

En relación con la línea 1 del STC (Metrorrey), esta línea emuló principalmente a las líneas 3 y del SITEUR y la línea 2-3 de su propio sistema. los factores principales que podrían estar asociados a su ineficiencia son la cantidad de pasajeros transportados durante el año con respecto a su capacidad de flota, así como con sus frecuencias, ya que en 2024 la línea 2-3 del STC (Metrorrey) logró movilizar más personas con menos capacidad de flota y menos frecuencias, de igual manera,

la línea 3 del SITEUR durante 2023 logró transportar una cantidad considerablemente mayor de personas con menor capacidad de flota y solo un poco más de frecuencias.

Al revisar el comportamiento de la línea B del STC (Metro) además de sus bajos niveles de eficiencia técnica pura es notorio que existió una caída en su desempeño entre 2023 y 2024. Con base en su comparación con la línea 2 del STC (Metro) la cual transportó una mayor cantidad de pasajeros con los mismos insumos en 2024 se puede intuir una posible causa en sus niveles de eficiencia ya que desde 2023 la línea B mantenía un menor desempeño proporcional con base en sus capacidad y flota con respecto a la línea 2.

Para el caso de la línea 9 del STC (Metro) que en el año que decayó mostrando ineficiencia relativa se comparó con la línea A del STC (Metro) se observa que tuvo un incremento importante en la capacidad de la flota en 2024, sin embargo, no tuvo un crecimiento proporcional en su demanda. Un caso similar se observa con respecto a la línea 1 del STC (Metro) la cual tuvo un mayor incremento proporcional en la capacidad de la flota en 2024, no obstante, esta tuvo incluso un decaimiento en su demanda. Estos comportamientos son consistentes con la caída en los niveles de eficiencia técnica pura.

Finalmente, una línea de especial interés es la línea 7 del STC (Metro) la cual si bien logró mejorar sus niveles de eficiencia técnica pura entre 2023 y 2024 muestra desajustes importantes de escala. En 2023 fue una de las líneas con puntuaciones más bajas ya que si se considera la línea A del STC (Metro) que fue su principal referencia, la línea 7 a pesar de tener ligeramente menos frecuencias programadas tuvo menos usuarios transportados con mayor cantidad de flota, situación que cambió en 2024 en el cual se hicieron ajustes en la cual se redujeron las frecuencias semanales planificadas y se incrementó ligeramente la flota lo que resultó en una mejor relación proporcional con la demanda atendida. A pesar de los ajustes operativos que dieron resultados positivos en torno a su nivel de demanda no se puede dejar de lado el hecho de que es una de las líneas con mayor desajuste agudizándose en 2024 año en el que se presentaron las mejoras relacionadas con la eficiencia técnica pura.

En conclusión, los modelos de eficiencia técnica (sin considerar variable ambiental) permiten visualizar las líneas con eficiencia técnica pura total, de igual manera, permite detectar ineficiencias técnicas producto de una gestión en la cual a comparación de otras DMUs eficientes no tienen una generación de productos maximizada dado su tamaño y capacidad operativa (Farrell, 1957) además, los modelos CRS y VRS de forma completaría permitieron identificar desajustes de escala lo que puede tener implicaciones en su desempeño operativo integral. Los análisis *benchmarking* muestran refuerzan la solidez del modelo pues los sistemas más pequeños como el SITEUR y el STC (Metrorrey) suelen referenciarse entre ellos y de manera interna. Asimismo, los modelos exponen heterogeneidad en la manera en la que se manifiestan los fenómenos contextuales los cuales son congruentes en los niveles de ineficiencia técnica pura e ineficiencias de escala. En general el enfoque de eficiencia técnica permitió distinguir líneas modelo, así como líneas con áreas de mejora marcando un precedente para un posterior análisis incorporando variables ambientales.

7.6 Resultados del modelo de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos constantes a escala (CRS)

En este apartado se muestran los resultados del modelo DEA que considera los insumos operativos anteriormente mencionados (capacidad de la flota, número de estaciones, frecuencia semanal planificada), así como el producto de pasajeros anuales transportados. De forma complementaria se añade el producto no deseado (*bad-output*) de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) representado por las toneladas de dióxido de carbono equivalentes CO₂eq el cual se obtiene a partir del consumo eléctrico realizado durante el año y el factor de emisiones. Se contemplan las 12 líneas del Sistema de Transporte Colectivo (Metro), las 3 líneas del Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) y la línea 1 y 2-3 del Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) para los años 2023 y 2024.

Como se mencionó con anterioridad los productos no deseados son aquellos que resultan de manera inherente de la actividad operativa de las Unidades de Toma de Decisiones (DMU) pero que tienen implicaciones negativas para el sistema o su entorno, por lo tanto, las emisiones indirectas de GEI que resultan de manera consecuente a la operación de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano generan un impacto ambiental no deseado, es por ello por

lo que las especificaciones de este modelo DEA tienen como objetivo evaluar la eficiencia incorporando la minimización del impacto ambiental, lo cual es complementario al modelo operativo antes analizado por lo que se busca ir más allá de la maximización de los productos deseados (Zhou y Liu, 2015).

A continuación, en la tabla 7.8 se muestran los puntajes obtenidos en el modelo anteriormente descritos considerando rendimientos constantes a escala y aplicado a la totalidad de las líneas estudiadas en el periodo analizado. Es importante retomar la advertencia metodológica de que los resultados de este modelo son únicamente de carácter complementario ya que de acuerdo con Seiford y Zhu (2002) la transformación de los productos no deseados no es posible bajo rendimientos constantes a escala.

Tabla 7.8

Resultados del modelo DEA de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos constantes a escala (CRS), 2023 y 2024

	2023	2024
CDMXL1	0.81409482	0.71563116
CDMXL2	1	1
CDMXL3	0.9903171	0.92790291
CDMXL4	0.94234499	0.94825318
CDMXL5	0.7837992	0.79550437
CDMXL6	0.80980507	0.78353003
CDMXL7	0.81150817	0.88304196
CDMXL8	0.86816129	0.82133091
CDMXL9	1	0.87263448
CDMXLA	1	1
CDMXLB	0.86486121	0.82869745
CDMXL12	0.55253021	0.78494983
GDLL1	1	0.9061862
GDLL2	1	1
GDLL3	1	1
MTYL1	0.97853794	0.94830207
MTYL23	1	1

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Las líneas que mostraron eficiencia total considerando la variable ambiental durante los años 2023 y 2024 fueron la línea 2, y A del STC (Metro) así como las líneas 2 y 3 del SITEUR y la línea 2-3 del STC (Metrorrey). Las líneas que fueron totalmente eficientes únicamente durante el 2023 fueron la línea 9 del STC (Metro) y la línea 1 del SITEUR. En el 2024 no existió ninguna línea que fuera eficiente en ese año que no lo fuera en 2023.

En relación con el STC (Metro) para 2023 el rango de ineficiencia relativa fue de 0.55 a 0.99, mientras que para 2024 este rango fue de 0.71 a 0.99. Con respecto al SITEUR no se mostraron ineficiencias relativas durante el 2023, mientras que en 2024 la línea 1 presentó baja ineficiencia relativa retratada en una puntuación de 0.90. Un caso similar al SITEUR se muestra con el STC (Metrorrey) en el cual sólo la línea 1 mostró ineficiencia relativa en 2023 y 2024 con una puntuación del 0.97 y 0.94 respectivamente.

Las líneas del STC (Metro) con las puntuaciones más bajas en 2023 dentro de este modelo que considera sus emisiones de GEI indirectas por consumo energía eléctrica son la línea 12 con una puntuación de 0.55, la línea 5 con una puntuación de 0.78, la línea 6 con una puntuación de 0.80 y las líneas 1 y 7 con un puntaje de 0.81. Para 2024 las líneas de este sistema con los peores resultados fueron la línea 1 con 0.71, la línea 6 y 12 con 0.78 seguida por la línea 5 con 0.79.

Continuando con el análisis del STC (Metro) las líneas que quedaron cerca de la eficiencia total en 2023, pero mostrando ineficiencias relativas se encuentran la línea 3 con 0.99, la línea 4 con 0.94 y las líneas 8 y B con 0.86. Mientras que en 2024 la línea que obtuvo una puntuación más cerca de la eficiencia es la línea 4 con 0.94, seguida de la línea 3 con un puntaje de 0.92 y la línea 7 con una puntuación de 0.88.

En el caso de las líneas que mostraron cambios significativos con respecto al 2023 y 2024 destaca la línea 1 del STC (Metro) el cual mostró una caída importante en sus niveles de eficiencia pasando de un puntaje de 0.81 en 2023 a un puntaje de 0.71 en 2024. El mismo fenómeno se presentó en la línea 9 del STC (Metro) pasando de la eficiencia total (1) a mostrar una puntuación de 0.87. El caso contrario sucede con la línea 12 del STC (Metro) la cual pasó de 0.55 en 2023 a 0.78 en 2024.

7.6.1 Referencias *benchmarking* del modelo de eficiencia técnica sostenible con rendimientos constantes a escala (CRS)

En seguida, se muestran los resultados del análisis de referencias (*benchmarking*) elaborado con base en el modelo DEA con el producto ambiental no deseado para las líneas y el periodo analizado. Como se mencionó con anterioridad, este análisis aporta información relacionada con las líneas eficientes que fueron consideradas en el modelo como referencia para las líneas no eficientes, lo que permite distinguir las líneas que definen la frontera eficiente considerando los resultados operativos y los impactos ambientales y retratando a su vez una operación consistente como se puede observar en la tabla 7.9:

Tabla 7.9

Benchmarking del modelo DEA de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos constantes a escala (CRS) 2023 y 2024

	2023	2024
CDMXL1	CDMXL2 (0.14), GDLL2 (0.79), GDLL3 (0.5)	CDMXL2(0.23), GDLL2 (0.39), GDLL3 (0.60)
CDMXL2	CDMXL2 (1)	CDMXL2 (1)
CDMXL3	CDMXL2 (0.87)	CDMXL2 (1)
CDMXL4	GDLL2 (0.98)	GDLL2 (0.98)
CDMXL5	CDMXL2 (0.1), CDMXLA (0.53), GDLL2 (0.18), GDLL3 (0.19)	CDMXL2 (0.18), CDMXLA (0.24), GDLL2 (0.62)
CDMXL6	CDMXLA (0.34), GDLL2 (0.75)	CDMXLA (0.38), GDLL2 (0.71)
CDMXL7	CDMXL2 (0.24), CDMXLA (0.52), GDLL3 (0.16)	CDMXL2 (0.35), CDMXLA (0.10), GDLL2 (0.43)
CDMXL8	CDMXL2 (0.71), GDLL2 (0.18),	CDMXL2 (0.67),
CDMXL9	CDMXL9 (1)	CDMXL2 (0.15), CDMXLA (0.81)
CDMXLA	CDMXLA (1)	CDMXLA (1)
CDMXLB	CDMXL2 (0.62), CDMXLA (0.18), GDLL3 (0.24)	CDMXL2 (0.65), GDLL2 (0.23), GDLL3 (0.17)
CDMXL12	CDMXLA (0.51), GDLL2 (0.58), GDLL3 (0.52)	CDMXL2 (0.52), GDLL2 (0.46), GDLL3 (0.16)
GDLL1	GDLL1 (1)	CDMXL2 (0.03) GDLL3 (0.15), MTYL23 (0.74)
GDLL2	GDLL2 (1)	GDLL2 (1)
GDLL3	GDLL3 (1)	GDLL3 (1)

MTYL1	GDLL2 (0.13), GDLL3 (0.44), MTYL23 (0.47)	GDLL2 (0.31), GDLL3 (0.13), MTYL23 (0.64)
MTYL23	MTYL23 (1)	MTYL23 (1)

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Como es posible distinguir en la tabla 7.9 la línea mayormente referencia en este modelo durante 2023 fue la línea 2 del SITEUR, siendo considerada por 7 líneas (sin contarse a sí misma) con una principal emulación por parte de la línea 4 del STC (Metro) por 0.98, le siguen la línea 1 del STC (Metro) por 0.79 y la línea 6 por 0.75. En este mismo año, otra de las líneas principalmente referidas es la línea 3 del SITEUR, siendo emulada principalmente por la línea 12 del STC (Metro) por 0.52, seguida por la línea 1 del STC (Metro) y la línea 1 del STC (Metrorrey) por 0.47.

En el año 2023, las líneas del STC (Metro) mayormente referenciadas son la línea 2 y la línea A. La primera es principalmente emulada por la línea 3 con una ponderación de 0.87, la línea 8 con una ponderación de 0.71 y la línea B por 0.62. En relación con la línea A las líneas que la emularon principalmente durante este año fueron la línea 12 por 0.58, la línea 5 por 0.53 y la línea 7 por 0.52.

Es importante notar que la línea 1 del STC (Metrorrey) presenta una alta emulación en 2023 con la línea 2-3 de su propio sistema con una ponderación de 0.47, situación que continúa con respecto a 2024 donde esta línea emula a la misma de su sistema por 0.64. Esto habla de una creciente similitud de operaciones entre el propio sistema.

Para 2024, la línea que fue empleada como referencia de manera más frecuente es la línea 2 con 9 líneas que emularon su desempeño, siendo la línea 3 emulándola en su totalidad la línea que referenció con mayor ponderación, le siguen las líneas 8, B y 12 con ponderaciones de 0.67, 0.65 y 0.52 respectivamente. La segunda línea más frecuentemente utilizada como referencia fue la línea 2 del SITEUR siendo principalmente emulada por la línea 4 por 0.98, seguida de la línea 6 y 5 con ponderaciones de 0.71 y 0.62 respectivamente. Otra de las líneas principalmente utilizadas como referencia fue la línea 3 del SITEUR, la línea 1 con una ponderación de 0.6 fue la que la emuló con más peso. Finalmente, la línea A fue otra de las más referenciadas durante este año que a pesar de ser menos frecuente que la línea 3 del SITEUR fue referida con más peso siendo emulada principalmente por la línea 9 por 0.81 y la línea 6 por 0.38.

Cabe resaltar que durante 2024 la línea 1 del SITEUR la cual resultó ineficiente emuló principalmente a la línea 2-3 del STC (Metrorrey) mostrando mayor afinidad operativa con líneas fuera de su sistema a pesar de que la línea 1 y 2 del propio fueron eficientes y altamente referenciadas.

7.6.2 Análisis de holguras (*slacks*) del modelo de eficiencia técnica sostenible con rendimientos constantes a escala (CRS)

En este apartado se muestra el análisis de holguras para el modelo DEA con rendimientos constantes a escala con el producto no deseado de emisiones de GEI basadas en el consumo eléctrico el cual hace posible capturar ineficiencias no radiales que se encuentran relacionadas con la subutilización de insumos, deficiencias en los productos y excesos en los productos no deseados.

Las holguras indican la distancia entre cada línea respecto a las operaciones que se encuentran sobre la frontera de eficiencia con un menor impacto ambiental, lo cual permite establecer condiciones de potencial mejora en los sistemas estudiados, los resultados de este análisis se muestran en la tabla 7.10 se emplearon abreviaturas para los insumos, productos y productos no deseados, Cap para capacidad, Est para el número de estaciones, Fre para frecuencias, Pas para pasajeros transportados anualmente y Emi para Emisiones indirectas.

Tabla 7.10

Análisis de holguras (slacks) del modelo de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos constantes a escala (CRS)

DMU	2023					2024				
	Cap	Est	Fre	Pas	Emi	Cap	Est	Fre	Pas	Emi
CDMXL1	0	0	0	0	15500	4001	0	0	0	0
CDMXL2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CDMXL3	8032	0	585	0	1892	0	0	0	0	0
CDMXL4	4907	0	0	2,132,840	0	4908	0	0	4,158,096	0
CDMXL5	0	0	0	0	0	2377	0	0	0	0
CDMXL6	3897	0	99	0	0	3182	0	79	0	0
CDMXL7	6386	0	0	0	0	11410	0	0	0	0
CDMXL8	0	0	174	0	1085	136	0	0	0	0

CDMXL9	0	0	0	0	0	1473	0	806	0	0
CDMXLA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CDMXLB	3628	0	0	0	0	5773	0	0	0	0
CDMXL12	42745	0	0	0	0	27939	0	0	0	0
GDLL1	0	0	0	0	0	776	0	0	0	0
GDLL2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GDLL3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MTYL1	2185	0	0	0	0	2867	0	0	0	0
MTYL23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Las líneas que muestran subutilización de la capacidad de la flota durante el 2023 (véase tabla 7.10) son las líneas 3, 4, 6, 7, B y 12 del STC (Metro) así como la línea 1 del STC (Metrorrey). Mientras que en el año 2024 incrementan las líneas que muestran problemas de subutilización de la flota siendo las cuales son las líneas 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, B, 12 del STC (Metro); 1 del SITEUR y la línea 1 del STC (Metrorrey). Esto retrata un menor control eficiente del capital móvil en los sistemas analizados con respecto al año anterior.

Con respecto al capital fijo para el cual se consideran el número de estaciones en este modelo no se presentaron problemas significativos para ninguna de las DMU durante 2023 y 2024. Caso contrario es para el insumo de las frecuencias semanales programadas ya que durante 2023 las líneas 3, 6, 7 y 8 del STC (Metro) señalan problemas con la gestión de este insumo. En 2024 fueron las líneas 6 y 9 las que presentaron el fenómeno anterior.

En el caso de los productos deseados, únicamente la línea 4 mostró problemas de deficiencia en 2023 y 2024, lo que retrata la necesidad de incrementar el número anual de pasajeros transportados. En relación con los productos no deseados se exhiben mayor cantidad de líneas con problemas de excesos, para 2023 las líneas 1, 3 y 8 del STC (Metro) muestran necesidad de reducción de emisiones, en 2024 no se presentan líneas con esta problemática cuando se consideran rendimientos constantes a escala.

7.7 Resultados del modelo de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos variables a escala (VRS)

En seguida, se muestran los resultados del modelo DEA considerando rendimientos variables a escala. Este tipo de modelos permite capturar la eficiencia técnica pura, la cual logra compensar los problemas que pueden surgir debido a diferencias en la escala de operación. Por lo tanto, los puntajes de eficiencia muestran el desempeño operativo en relación con la utilización de sus recursos y contemplando su impacto ambiental considerando las diferencias de tamaño y capacidad operativa.

Como es posible observar en la tabla 7.11 se muestran los puntajes de eficiencia considerando rendimientos variables a escala, se emplearon los mismos insumos que fueron considerados con anterioridad como capacidad de la flota, número de estaciones, frecuencias semanales planificadas, número de pasajeros transportados durante el año, así como emisiones indirectas de GEI atribuidas al consumo eléctrico total de operaciones durante el año. Se contemplan las 12 líneas del STC (Metro), las 3 líneas del SITEUR y las líneas 1 y 2-3 del STC (Metrorrey) para los años 2023 y 2024. Los puntajes se muestran de 0 a 1 donde 0 es totalmente ineficientes y 1 totalmente eficientes.

Tabla 7.11

Resultados del modelo DEA de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos variables a escala (VRS), 2023 y 2024

	2023	2024
CDMXL1	0.90658865	0.88075047
CDMXL2	1	1
CDMXL3	0.99545196	0.94618776
CDMXL4	1	1
CDMXL5	0.79791487	0.82766794
CDMXL6	0.88601992	0.85407263
CDMXL7	0.859083	0.98713666
CDMXL8	0.88245884	0.83089756
CDMXL9	1	0.87871088
CDMXLA	1	1
CDMXLB	0.90870127	0.87637198
CDMXL12	0.8787215	0.89349826

GDLL1	1	1
GDLL2	1	1
GDLL3	1	1
MTYL1	1	1
MTYL23	1	1

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Al revisar la tabla 7.11 es posible observar que las líneas que mantuvieron eficiencia técnica pura total en 2023 y 2024 fueron la línea 2, 4 y A del STC (Metro); las líneas 1, 2 y 3 del SITEUR y las líneas 1 y 2-3 del STC (Metrorrey). En este modelo únicamente la línea 9 resultó totalmente eficiente solamente durante 2023, con respecto al caso contrario, no existieron líneas que fueran únicamente eficientes durante 2024.

A partir de la información anterior, se puede destacar que todas las líneas del SITEUR y el STC (Metrorrey) fueron eficientes durante los años analizados cuando se considera su impacto ambiental y rendimientos variables a escala. Por el caso contrario, incluso con ajustes de escala, el STC (Metro) mostró ineficiencias relativas que en el 2023 van de 0.79 a 0.99 y que para el caso del 2024 oscilan entre 0.82 a 0.98. Estos resultados exponen una mayor homogeneidad de operación dentro de los sistemas instalados en Jalisco y Nuevo León, mientras que existe una heterogeneidad operativa persistente en el STC (Metro) instalado en la Ciudad de México.

Las líneas peor evaluadas durante el 2023 en el STC (Metro) fueron la línea 5 con un puntaje de 0.79, la línea 7 con un puntaje de 0.85 y la línea 12 con una puntuación de 0.87. En este mismo año, la línea que se mantuvo más cerca de la frontera de eficiencia fue la línea 3 con un puntaje de 0.99.

Para el año 2024, las líneas que tuvieron un peor desempeño considerando su impacto ambiental fueron la línea 5 con una puntuación de 0.82, la línea 8 con una puntuación de 0.83 y la línea 6 con una puntuación de 0.85. La línea que tuvo menor ineficiencia relativa en este periodo fue la línea 7 con una puntuación de 0.98 mostrando una notable mejora con respecto al año anterior con las características propias de este modelo.

En relación con los cambios temporales, la línea 1 muestra caída en su desempeño entre 2023 y 2024 ya que pasa de una puntuación de 0.90 a 0.88, la línea 3 muestra un cambio significativo empeorando su eficiencia entre los años estudios pasando de ser la línea con el mejor desempeño a tener una puntuación de 0.94. La línea 5 muestra una ligera mejora en su eficiencia, sin embargo, en ambos años es la peor evaluada. La línea 6 muestra una ligera caída en los años comparados pasando de un puntaje de 0.88 a 0.85 al igual que la línea 8 la cambia pasa de 0.88 a 0.82, comportamiento que repite la línea B pasando de 0.90 a 0.87. Por último, la línea 12 muestra una importante mejora con respecto a 2023 ya que pasa de colocarse en los últimos puestos a tener una eficiencia de 0.89.

7.7.1 Referencias *benchmarking* modelo de eficiencia técnica sostenible con rendimientos variables a escala (VRS)

En este apartado se exponen los resultados del análisis *benchmarking* obtenidos del modelo DEA con variable ambiental y rendimientos variables a escala. Como ya se ha explicado, estos análisis funcionan para conocer las líneas eficientes que son emuladas por las ineficientes, así como su nivel de comparación. Al realizar las referencias con ajustes de escala se consigue una comparación más adecuada de acuerdo con la capacidad operativa de cada línea incluyendo su comportamiento con respecto a su impacto ambiental. Estas referencias pueden ser vistas en la tabla 7.12:

Tabla 7.12

Benchmarking del modelo DEA de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos variables a escala (VRS) 2023 y 2024

	2023	2024
CDMXL1	CDMXL2 (0.13), GDLL3 (0.86),	CDMXL2 (0.15), GDLL3 (0.84)
CDMXL2	CDMXL2 (1)	CDMXL2 (1)
CDMXL3	CDMXL2 (0.75), CDMXL9 (0.25)	CDMXL2 (0.78), CDMXLA (0.21)
CDMXL4	CDMXL4 (1)	CDMXL4 (1)
CDMXL5	CDMXL2 (0.06), CDMXLA (0.61), GDLL3 (0.3)	CDMXL2 (0.21), CDMXLA (0.06), GDLL2 (0.72)
CDMXL6	CDMXLA (0.26), GDLL2 (0.59), GDLL3 (0.14)	CDMXL2 (0.07), CDMXLA (0.04), GDLL2 (0.88)
CDMXL7	CDMXL2 (0.17), CDMXLA (0.65), GDLL1 (0.17)	CDMXL2 (0.28), CDMXLA (0.1), GDLL2 (0.61)

CDMXL8	CDMXL2 (0.64), CDMXLA (0.14), GDLL2 (0.21)	CDMXL2 (0.64), CDMXLA (0.06), GDLL2 (0.29)
CDMXL9	CDMXL9 (1)	CDMXL2 (0.14), CDMXLA (0.85)
CDMXLA	CDMXLA (1)	CDMXLA (1)
CDMXLB	CDMXL2 (0.61), CDMXLA (0.04), GDLL3 (0.33)	CDMXL2 (0.59), GDLL2 (0.02), GDLL3 (0.38)
CDMXL12	CDMXL2 (0.01), GDLL3 (0.98)	CDMXL2 (0.4), GDLL3 (0.59)
GDLL1	GDLL1 (1)	GDLL1 (1)
GDLL2	GDLL2 (1)	GDLL2 (1)
GDLL3	GDLL3 (1)	GDLL3 (1)
MTYL1	MTYL1 (1)	MTYL1 (1)
MTYL23	MTYL23 (1)	MTYL23 (1)

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Al explorar la tabla 7.12 es posible identificar que en 2023 la línea que es más frecuentemente utilizada como referencia es la línea 2 del STC (Metro) siendo principalmente emulada por la línea 3 con una ponderación de 0.75, la línea 8 con una ponderación de 0.68 y la línea B con una ponderación de 0.61. La segunda línea con el mayor número de referencias durante este periodo fue la línea 3 del SITEUR, la línea 12 del metro de la Ciudad de México la emulo con una ponderación de 0.98 siendo la que la refirió con mayor peso. También se destacan la línea A del STC (Metro) la cual fue principalmente referenciada por la línea 5 con una ponderación de 0.61, así como la línea 2 del SITEUR siendo comparada en mayor medida con la línea 6 con una ponderación de 0.59.

Con relación al 2024, es posible detectar que la línea 2 del STC (Metro) es la que fue emulada más frecuentemente principalmente por la línea 3 con una ponderación de 0.78, mientras que la línea 8 se le comparó por 0.64 y la línea B por 0.59. La segunda línea más referenciada durante este año fue la línea A del STC (Metro) comparada con mayor intensidad en una ponderación de 0.85 por la línea 9 del STC (Metro) y 0.24 por la línea 3 del STC (Metro). Es importante resaltar que la línea 2 del SITEUR fue altamente emulada, en 0.88 por la línea 6 del STC (Metro) y en 0.72 por la línea 5 del mismo sistema. No se puede ignorar que la línea 3 del SITEUR también fue una de las líneas principales que se emplearon como referencia en este periodo, siendo emulada por la línea 1 del STC (Metro) por 0.84 y por la línea 12 en una ponderación de 0.59.

De igual manera, cabe destacar que al resultar eficientes en todas sus líneas el SITEUR y el STC (Metrorrey) sus Unidades de Toma de Decisión fueron emuladas por sí mismas. Es también importante señalar que, a pesar de pertenecer a un sistema más pequeño, las líneas 2 y 3 del SITEUR mantuvieron gran relevancia en ambos años como líneas eficientes que funcionaron como referentes para las líneas ineficientes incluso con los ajustes de escala propios del modelo.

7.7.2 Análisis de holguras (*slacks*) del modelo de eficiencia técnica sostenible con rendimientos variables a escala (VRS)

En esta sección se aborda el análisis de holguras del modelo DEA con rendimientos variables a escala y considerando el producto no deseado de las emisiones indirectas de GEI. No carece de pertinencia volver a señalar que las holguras retratan problemas de excesos en los insumos y producto no deseados, así como deficiencias en los productos, permitiendo capturar información valiosa para comprender desequilibrios operativos en las Unidades de Toma de Decisiones.

En este caso, es de gran interés conocer excesos en la variable ambiental, ya que por las características del modelo se realizan los ajustes a escala lo que permite tener una visión más cercana a la realidad operativa de las líneas y sus problemas de subutilización y deficiencias, esta información puede ser observada en la tabla 7.13 que se muestra a continuación. Los insumos fueron abreviados de la siguiente manera Cap para capacidad de la flota, Est para el número de estaciones, Fre para las frecuencias semanales planificadas; el producto fue abreviado como Pas para el número de pasajeros y los productos no deseados fueron abreviados como Emi para las emisiones indirectas de GEI por consumo eléctrico.

Tabla 7.13

*Análisis de holguras (*slacks*) del modelo de eficiencia técnica sostenible considerando rendimientos variables a escala (VRS)*

	2023					2024				
DMU	Cap	Est	Fre	Pas	Emi	Cap	Est	Fre	Pas	Emi
CDMXL1	1635	2	482	0	0	8538	2	379	0	0
CDMXL2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CDMXL3	4972	0	266	0	5989	15081	0	417	0	0

CDMXL4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CDMXL5	0	0	37	0	0	4511	0	98	0	0
CDMXL6	5591	0	257	0	0	6817	0	261	0	0
CDMXL7	6944	0	0	0	3657	14218	0	0	0	9736
CDMXL8	0	0	91	0	6600	11366	0	786	0	13372
CDMXL9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CDMXLA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CDMXLB	6500	0	145	0	0	8229	0	166	0	0
CDMXL12	53597	3	913	0	0	32635	0	345	0	0
GDLL1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GDLL2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GDLL3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MTYL1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MTYL23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

A partir de la tabla 7.13 es posible distinguir que las líneas que mantienen holguras en cuestión del insumo de capacidad de la flota durante 2023 son la línea 1, 3, 6, 7, B y 12 del STC (Metro). Mientras que para el año 2024 las líneas que presentaron excesos significativos de este insumo fueron las líneas 1, 3, 5, 6, 7, 8, B y 12 por lo cual se observa que una mayor cantidad de DMU tuvieron problemas durante 2024 en relación con subutilización de la flota.

En cuestión al número de estaciones, en 2023 las líneas que presentaron holguras en en relación con el capital fijo de infraestructura fueron la línea 12 y 2 del STC (Metro), sin embargo, para el año 2024 únicamente en la línea 1 del STC (Metro) se detectan problemas significativos en torno al uso de las estaciones a partir de las holguras.

Con respecto al insumo relacionado con la capacidad e intensidad operativa evaluado a partir de las frecuencias semanales planificadas se identifican excesos en las líneas 1, 3, 5, 8, B y 12 durante el año 2023. Mientras que para el año 2024 las líneas que presentan holguras en relación con el insumo antes mencionado fueron las líneas 1, 3, 5, 6, 8, B y 12 del STC (Metro). Estos resultados muestran consistencia entre las DMUs que presentan excesos en cuestión de la capacidad e intensidad operativa planificada.

A partir de la tabla 7.13 se puede evidenciar que el producto considerado en el modelo no se encuentra desequilibrado en las DMU estudiadas cuando se analizan las holguras debido a que ninguna línea presentó *slacks* durante los años estudiados, no obstante, no es el mismo caso para los productos no deseados, ya que a partir de los resultados del modelo es importante que las líneas 3, 7 y 8 del STC (Metro) reduzcan sus emisiones con base en datos del 2023 y las líneas 7 y 8 para el caso del 2024.

7.8 Eficiencia de escala del modelo de eficiencia técnica sostenible

En este apartado se exponen los resultados de la eficiencia a escala del modelo de eficiencia técnica sostenible que incorpora el producto no deseado de emisiones indirectas de GEI por consumo eléctrico, la cual se obtuvo a partir del cociente de los puntajes obtenidos en el modelo con rendimientos a escala sobre el puntaje obtenido en el modelo con rendimientos variables a escala. La finalidad de este análisis es identificar si las DMU analizadas operan con una escala consistente con un desempeño ambiental favorable. No se pretenden hacer afirmaciones causales en relación con la escala de operación sino generar bases interpretativas vinculadas a adecuación de la escala considerando su impacto ambiental. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 7.14.

Tabla 7.14

Resultado de la eficiencia a escala del modelo de eficiencia técnica sostenible 2023-2024

	2023	2024
CDMXL1	0.8143947	0.81252431
CDMXL2	1	1
CDMXL3	0.99625292	0.98067524
CDMXL4	1	0.94825318
CDMXL5	0.89014344	0.96113953
CDMXL6	0.90053165	0.91740445
CDMXL7	0.93064101	0.89454885
CDMXL8	0.90006405	0.98848636
CDMXL9	1	0.99308487
CDMXLA	1	1
CDMXLB	0.89535586	0.94560012
CDMXL12	0.58872936	0.87851299
GDLL1	1	0.9061862

GDLL2	1	1
GDLL3	1	1
MTYL1	0.8946714	0.94830207
MTYL23	1	1

Fuente: elaboración propia con base en Rstudio (2025)

Como se identifica en la tabla 7.14 las líneas que fueron totalmente eficientes a escala durante 2023 y 2024 considerando su impacto ambiental fueron la línea 2 y A del STC (Metro), así como las líneas 2 y 3 del SITEUR y la línea 2-3 del STC (Metrorrey). Las líneas que mostraron eficiencia total únicamente durante 2023 son la línea 4 y la línea 9 del STC (Metro). Ninguna línea fue totalmente eficiente exclusivamente durante 2024.

En relación con la eficiencia a escala del SITEUR este mantuvo un buen nivel durante el periodo analizado, únicamente la línea 3 mostró ineficiencia a escala en el año 2024 con una puntuación de 0.90 lo cual expresa un manejo a escala mayormente homogéneo por parte de este sistema. El STC (Metrorrey) presenta una situación más heterogénea ya que la línea 1 no logró la eficiencia total en ninguno de los dos años analizados, no obstante, su eficiencia a escala aumentó de 2023 a 2024 ya que pasó de un puntaje de 0.89 a 0.94 lo cual puede retratar adecuaciones en la escala de operación.

El STC (Metro) es de los sistemas estudiados el que muestra un comportamiento más heterogéneo ya que los resultados exponen importantes diferencias entre el desempeño a escala de las líneas analizadas. Dentro de este sistema, las líneas que mostraron cambios en el periodo estudiado fueron la línea 9 y la línea 4 las cuales pasaron de la eficiencia total a mostrar ineficiencias relativas, siendo esta última la que mostró un mayor decaimiento en torno a su eficiencia escala, ya que en 2023 fue evaluado con eficiencia total y en 2024 con un puntaje de 0.94. Un caso similar se presenta con la línea 7 ya que pasó de una puntuación de 0.93 en 2023 a 0.89 en 2024.

En relación con las líneas del STC (Metro) que presenta resultados consistentes entre el periodo analizado destaca la línea 1 que mantuvo un puntaje de 0.81 en ambos años, la línea 3 que osciló entre 0.99 y 0.98 y la línea 6 la cual se mantuvo entre 0.90 y 0.91. En los casos que tuvieron un desempeño favorable en 2024 con respecto a 2023 se identifican a la línea 5, 8, B y 12 siendo esta

última la cual tuvo un incremento más significativo en su eficiencia a escala pasando de 0.58 en 2023 a 0.87 en 2024.

Las líneas del STC (Metro) con un peor desempeño a escala durante 2023 fueron la línea 12 con una puntuación de 0.58 y la línea 1 con una puntuación de 0.81. Para 2024 la línea con peor desempeño fue la línea 1 con una puntuación de 0.81 y la línea 12 con una puntuación de 0.87. En el caso contrario, las líneas que están más cerca de la eficiencia a escala fueron la línea 3 y la línea 7 con puntuaciones de 0.99 y 0.93 respectivamente, en 2024 las líneas con el puntaje más alto fue la línea 9 con 0.99, la línea 3 y la línea 8 con 0.98.

7.9 Discusión del modelo de eficiencia técnica sostenible y su contraste con el modelo de eficiencia técnica

Este apartado tiene como objetivo sintetizar los principales hallazgos que resultaron de los modelos DEA con rendimientos variables a escala VRS, así como con rendimientos constantes a escala CRS y la eficiencia a escala. Se contempló un producto no deseado de impacto ambiental lo cual permitió identificar líneas que presentaron eficiencia técnica pura y de escala, así como situaciones de ineficiencia debido a la escala, al manejo operativo o ambas. Con apoyo de las holguras y análisis de referencia se plantean diversas interpretaciones de vínculos entre las características operacionales de las líneas con los fenómenos de ineficiencia, así como mejoras y caídas temporales, finalmente estos resultados fueron comparados y contrastados con lo explicado en el modelo de eficiencia técnica (sin variable ambiental).

En estos modelos DEA se emplearon los mismos insumos y productos que en el modelo de eficiencia técnica (sin variable ambiental) los cuales fueron capacidad de la flota, número de estaciones, pasajeros transportados durante el año, así como emisiones indirectas de GEI producto del consumo eléctrico total anual. Como se indicó en el capítulo anterior, las emisiones indirectas de GEI fueron calculadas multiplicando el consumo eléctrico anual total por el factor de emisiones, este consumo engloba la actividad de los trenes, así como la alimentación a las estaciones.

Al igual que en la síntesis y discusión del modelo de eficiencia técnica resulta conveniente partir del modelo DEA que considera rendimientos variables a escala, VRS este modelo permite detectar líneas que presentaron eficiencia técnica pura, lo cual indica un manejo adecuado de sus insumos

en la maximización de los productos considerando su tamaño o capacidad operativa. Como se retrata en la tabla 7.11, los resultados muestran comportamientos contrastantes entre el SITEUR y el STC (Metrorrey) con respecto al STC (Metro).

En 2023 y 2024 todas las líneas del SITEUR y el STC (Metrorrey) mostraron total eficiencia técnica pura sostenible, sin embargo, el STC (Metro) mostró líneas eficientes, pero también permitió identificar líneas con ineficiencias en la gestión operativa. En este modelo se presentaron mayores diferencias temporales en cuanto al desempeño.

En 2023 las líneas con total eficiencia técnica pura sostenible del STC (metro) fueron la línea 2, 4, 9 y A. en 2024 fueron 2, 4 y A. En 2023 las líneas con el desempeño más bajo fueron la línea 5, la línea 7 y la línea 12. Mientras que en 2024 estas fueron la línea 5, la línea 8 y la línea 6. Como se puede observar la línea 5 fue la que mostró un bajo desempeño consistente entre el periodo estudiado.

En cuestión de los cambios temporales, se destaca el caso de la línea 1 del STC (Metro) la cual empeoró su puntaje de eficiencia técnica pura sostenible en 2024 con respecto a 2023, mismo caso con la línea 6, la línea 8 y la línea 9. Caso inverso con la línea 12 y la línea 7 del STC (Metro) las cuales logran mejorar su eficiencia en el periodo de análisis.

En torno a las holguras indican márgenes de mejora más allá de lo aportado por los puntajes de eficiencia técnica pura sostenible, para esta discusión, resulta relevante identificar las líneas que mostraron exceso de emisiones, en este caso, la línea 3 del STC (Metro) que se encuentra cerca de alcanzar la eficiencia técnica pura en 2023 manifestó una importante área de oportunidad en torno a la reducción de las emisiones, de la misma manera, las línea 7 y 8 requieren reducir sus emisiones ya que estas líneas no lograron mejorar sus holguras ambientales las cuales se manifiestan en 2023 y 2024 lo cual puede guardar relación con su bajo desempeño técnico relativo.

En torno a las líneas con eficiencia técnica pura, al revisar los resultados considerando rendimientos constantes a escala CRS (véase tabla 7.8) ninguna de las líneas mostró tener problemas importantes de desajuste de escala. En 2023, únicamente la línea 1 del STC (Metrorrey)

presentó un ligero desajuste a escala, en 2024 fueron la línea 4 del STC (Metro), la línea 3 del SITEUR y la línea 1 del STC (Metrorrey) las cuales tuvieron eficiencia técnica pura pero no total eficiencia a escala.

A partir de lo anterior, se pueden destacar las líneas que tuvieron un mejor desempeño integral, es decir que en la totalidad del periodo estudiado alcanzaron la eficiencia técnica pura sostenible, no presentaron desajustes de escala y fueron frecuentemente utilizadas como referencias. Las líneas que cumplen con estas características son la línea 2 del STC (Metro), la línea A del STC (Metro) la línea 3 del SITEUR.

En convergencia de las líneas con ineficiencia técnica pura sostenible y desajustes de escala destacan la línea 1 del STC (Metro) la cual resultó ineficiente en el modelo con rendimientos variables, pero además mantuvo niveles bajos de eficiencia a escala siendo la segunda peor evaluada en 2023 y la peor evaluada en 2024, no obstante, es importante señalar que su nivel de eficiencia a escala es consistente para ambos años analizados. Por otra parte, la línea 12 del STC (Metro) fue la más ineficiente a escala durante 2023 pero mejoró su eficiencia en 2024.

Incorporando a la discusión los resultados del modelo de eficiencia técnica (sin variable ambiental) la principal distinción es que los niveles de eficiencia técnica operativa logran mejorarse de manera notoria al incorporar una variable ambiental, en este sentido, incrementa la cantidad de DMU que son totalmente eficientes. Se distingue que en el modelo operativo simple el SITEUR y el STC (Metrorrey) mostraban una mayor heterogeneidad e ineficiencias técnicas, no obstante, en el modelo ambiental a pesar de ser sistemas más pequeños y recientes que el STC (Metro) se convierten totalmente eficientes en cuestión de la gestión operativa cuando se incorpora una variable ambiental respaldada en el consumo eléctrico, finalmente, al igual que en la eficiencia técnica pura, la mayoría de las líneas mejoran sus desajustes a escala a excepción de la línea 1 y la línea 12.

Es importante enfatizar en el uso del consumo eléctrico anual total como variable de aproximación al impacto ambiental. Se consideró el mismo factor de emisión debido a que es de carácter federal. De acuerdo con la naturaleza operativa de los sistemas de tren urbano y con la literatura el consumo

eléctrico suele ser un elemento del cual se tiene alto monitoreo, control y ajustes operativos, estudios como el de Yu *et al.* (2023) en el metro de Tianjin, China, ponen en evidencia que las líneas de metro presentan patrones de consumo eléctrico poco heterogéneos con una baja dispersión y estables en cuestión de la tracción y ante la demanda, sus principales variaciones están asociadas a cambios estacionales.

De igual manera, no se debe de ignorar que los sistemas de transporte público ferroviario urbano cuentan con herramientas tecnológicas operadas por equipos robustos de personas las cuales buscan niveles establecidos de eficiencia y eficacia, por lo cual monitorean constantemente el desempeño operativo cotidiano y realizan los ajustes pertinentes en torno a la intensidad necesaria de la operación la cual está vinculada de manera directa con el consumo de energía eléctrica.

A partir de lo anterior se puede decir que los sistemas de transporte público ferroviario urbano mantienen una variación más homogénea entre las líneas, ya que en gran medida se mantiene proporcional a la capacidad y nivel de demanda de las DMUs en comparación con otros insumos del sistema. Lo anterior permite que no existan diferencias altamente significativas en relación con la frontera eficiente, sino que se mantiene relativa frente a las ineficiencias de carácter operativo y se manifieste como un insumo de control operativo cotidiano.

Con la intención de mostrar consistencia en los resultados obtenidos al incorporar la variable ambiental resulta relevante mencionar que se realizaron pruebas de especificaciones del modelo. Para lo cual el producto no deseado fue introducido como un insumo, los niveles de eficiencia, así como los conjuntos de unidades eficientes no mostraron cambios drásticos lo que sugiere que los resultados obtenidos son robustos con respecto a la forma de especificación del modelo y siguen las recomendaciones metodológicas y conceptuales relacionadas con el tratamiento de externalidades no deseadas de la actividad productiva.

De forma complementaria para corroborar la consistencia del modelo se realizaron comparaciones entre las emisiones de GEI por pasajero por año y los puntajes de eficiencia obtenidos. Estas comparaciones fueron totalmente compatibles para la mayoría de las líneas, no obstante, resalta el

caso de la línea 4 SITEUR la cual, a pesar de salirse del rango de emisiones per cápita de las líneas eficientes (situación que no se presenta con ninguna otra DMU) logra mantener su eficiencia.

Los datos sugieren que la línea 1 del SITEUR al operar bajo una proporción adecuada de pasajeros que transporta anualmente con respecto capacidad de flota y frecuencias semanales planificadas mantiene una eficiencia técnica pura estable y consistente, la cual no se ve afectada por sus elevadas emisiones por pasajero. Lo anterior es congruente con las holguras del modelo ambiental, en las cuales la capacidad de la flota y las frecuencias semanales programadas son los excesos que se manifiestan de manera más frecuente.

Una de las situaciones contrastantes entre el modelo de eficiencia técnica sostenible y el modelo de eficiencia técnica son los resultados de eficiencia a escala de la línea 1 y la línea 12 del STC (Metro). Estas líneas mostraron cambios importantes en sus niveles de eficiencia técnica pura en el modelo sostenible y operativo simple, la línea 1 empeoró su desempeño mientras que la línea 12 lo mejoró. Sin embargo, la línea 1 mantuvo una eficiencia a escala baja pero constante, por otro lado, la línea 12 mantiene importantes desajustes a escala, pero la mejora entre años es notoria.

Este comportamiento podría estar vinculado con el tamaño y la rigidez operativa de las líneas, los fenómenos contextuales suelen mantener el consumo eléctrico constante en las líneas grandes y con operaciones más rígidas lo que mantiene constante la eficiencia a escala, mientras que las líneas con mayor flexibilidad operativa suelen reflejarse en una eficiencia a escala más sensible a la demanda e intensidad de la operación.

En este apartado fue posible observar los patrones relevantes en torno al desempeño de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano analizadas cuando se incorpora una variable ambiental, los resultados de manera general mostraron ser más positivos que los del modelo de eficiencia técnica (sin variable ambiental) lo cual sugiere que las emisiones de GEI producto del consumo eléctrico funciona como un factor complementario que permite relativizar las ineficiencias operativas sin ocultarlas, esto debido a que es el consumo eléctrico es un insumo del cual se posee más control de manera cotidiana con respecto a los cambios en la demanda y a demás mantiene un comportamiento general más homogéneo.

Las holguras y niveles de eficiencia bajos similares al modelo de eficiencia técnica sin variable ambiental sugiere que las principales áreas de oportunidad de la eficiencia técnica pura radican en la gestión de los insumos operativos instalados en relación con su demanda, en especial con la capacidad de la flota y las frecuencias programadas. De igual manera, se sugiere que los choques temporales provocados por fenómenos contextuales tienden a manifestarse de manera heterogénea en la eficiencia técnica pura y la eficiencia a escala.

En resumen, los sistemas de SITEUR y STC (Metrorrey) se vuelven completamente eficientes con rendimientos variables (eficiencia técnica pura) al momento de incorporar una variable ambiental, mientras que el STC (Metro) muestra mayor heterogeneidad presentando ineficiencias importantes en algunas de sus líneas lo cual muestra cierta congruencia con la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG) para 2023 en la que el SITEUR y STC (Metrorrey) fueron sistemas con satisfacción ciudadana por encima del 50%, en caso del SITEUR mayores al 90%, en contraste con el STC (Metro) donde los reportes señalan que menos de la mitad de los usuarios está satisfecho con este servicio, lo anterior puede sugiere un posible vínculo entre la percepción ciudadana con el volumen de demanda de los usuarios y sus niveles generales de eficiencia observados en el modelo DEA.

Capítulo 8

Eficiencia de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México. Propuesta de política pública

8.1 Introducción

En este capítulo, se presenta una propuesta de política pública cuyo objetivo se encuentra orientado a fortalecer la eficiencia operativa y ambiental de los sistemas de tren urbano en México analizados a lo largo de esta investigación. Esta propuesta se hace en función de los resultados de análisis empírico que fueron obtenidos a través de distintos modelos del Análisis Envolvente de Datos (DEA). Los sistemas que fueron considerados para esta evaluación y propuesta son el Sistema de Transporte Colectivo Urbano (Metro) de la Ciudad de México, el Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) de Guadalajara y el Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) de Monterrey. Se consideraron dos enfoques uno orientado a la medición de la eficiencia técnica y otro a la medición de la eficiencia técnica sostenible. La propuesta se ha realizado en función de los lineamientos normativos y de política pública, por un lado, considerando la evaluación como un eje, por otro la planeación y la inversión estratégica.

8.2 Fundamentos de la propuesta denominada “Programa para la evaluación y operación eficiente y sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México”

Como se explicó con anterioridad, el marco normativo federal actual en México a través de la Constitución y la Ley General de Movilidad y Seguridad Vial define de forma clara y explícita la eficiencia y la sostenibilidad como pilares del derecho a la movilidad. No obstante, a partir de los resultados obtenidos en la aplicación de los modelos DEA descritos en el capítulo anterior se puede

observar que los sistemas de transporte público ferroviarios de México que fueron analizados tienen ineficiencias técnicas e ineficiencias técnicas sostenibles a nivel línea, lo que muestra un comportamiento heterogéneo entre los sistemas y de forma interna, estas inconsistencias son también de carácter temporal pues se identificaron casos de variaciones importantes en el desempeño de una línea con respecto a los periodos analizados. De igual forma, se identificaron casos de ineficiencia no radial relacionadas con subutilización de los insumos.

La Estrategia Nacional de Movilidad y Seguridad Vial (ENAMOV) así como la Política Nacional de Transporte Público Colectivo Urbano (PNTPCU) han establecido de forma clara la necesidad de generar evaluaciones y diagnósticos orientados a mejorar el desempeño y operación de los servicios de transporte público. En este sentido, de manera general se ha propuesto la construcción de herramientas metodológicas que por una parte permitan evaluar el desempeño de los sistemas de transporte público y que por otro lado hagan posible la determinación de criterios para llevar a cabo ajustes y transformaciones estratégicas de estos servicios orientadas a una mejor operación. De igual manera, se ha expresado la necesidad la incorporación de Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) que permitan un mejor monitoreo del desempeño y operación de estos servicios, así como fomentar la confiabilidad por parte de los usuarios con el objetivo de motivar la demanda.

A partir del marco de intervención anteriormente descrito se hace presente la necesidad de la definición de una herramienta metodológica cuantitativa basada en evidencia empírica que permita la evaluación de los sistemas y una intervención basada en resultados para mejorar su operación, así como la incorporación de TICs para optimizar estos procesos de evaluación y monitoreo y para elevar la experiencia del usuario buscando que se traduzca en incremento en la demanda. Es por ello que se hace la propuesta de política pública titulada “Programa para la evaluación y operación eficiente y sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México” el cual se encuentra compuesto por tres ejes con sus respectivas actividades basadas en las recomendaciones de Darido *et al.* (2018) y Rivas *et al.* (2019) bajo lineamientos del Banco mundial y el Banco Interamericano para el Desarrollo respectivamente, así como en armonía con los objetivos y actividades de la ENAMOV y PNTPCU elaborados por la Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (2023) y el Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial (2024)

A continuación, se muestra el resumen narrativo del programa propuesto señalando su fin, propósito, componentes y actividades siguiendo el esquema tradicional de la matriz del marco lógico, véase la tabla 8.1:

Tabla 8.1

Resumen crítico del Programa para la evaluación y operación eficiente y sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México

Título del programa	Programa para la evaluación y operación eficiente y sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México		
Fin	Garantizar el derecho a la movilidad en condiciones de seguridad vial, accesibilidad, eficiencia, sostenibilidad, calidad, inclusión e igualdad.		
Propósito	Mejorar los niveles de eficiencia técnica y eficiencia técnica sostenible de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México.		
Componentes	1. Institucionalización de la metodología DEA para la evaluación de la eficiencia.	2. Planificación para la inversión estratégica en transporte basada en resultados.	3. Implementación de TICs para el mejoramiento de la recolección y procesamiento de datos.
Actividades	1.1 Establecimiento interinstitucional de la metodología DEA como herramienta para la evaluación y gestión operativa. 1.2 Creación de un organismo técnico de evaluación.	2.1 Gestión e inversión estratégica en el capital móvil. 2.2 Gestión e inversión estratégica en la infraestructura. 2.3 Gestión e inversión estratégica en la planificación y capacidad operativa.	3.1 Conversión de sistemas de pago a sistemas de inteligencia operativa. 3.2 Implementación de técnicas de monitoreo GPS y control operativo en tiempo real.

1.3	Identificación y robustecimiento de indicadores para la medición de la eficiencia técnica y construcción de los modelos DEA.	2.4	Planificación estratégica orientada al incremento en la demanda.	3.3	Uso de metodologías analíticas y predictivas para optimizar la operación y evaluación.
1.4	Comunicación y publicación de los resultados obtenidos y su aplicación en la gestión		2.5	Planificación estratégica orientada a la reducción de emisiones indirectas de GEI.	

Fuente: elaboración propia

A partir del modelo del ciclo de las políticas públicas propuesto por Arias y Herrera (2017) se identifica que programa propuesto con base en los objetivos de esta investigación tiene incidencia en dos fases del ciclo, en primer lugar, en la evaluación de las políticas, ya que se enfoca en la evaluación de la eficiencia de una intervención pública (OCDE, 2022), de igual forma, por la naturaleza del proceso de evaluación se identifica que también incide en el rediseño de la política pública al identificar posibles áreas de mejora en la gestión operativa (Arias y Herrera, 2017).

8.3 Eje 1: Institucionalización de la metodología DEA para la evaluación de la eficiencia

El primer componente de este programa propuesto tiene que ver con lo establecido en los objetivos 2.1.8, 2.2.7 de la ENAMOV y con el objetivo 7.1 de la PNTPCU en torno a la elaboración de instrumentos metodológicos que permitan evaluar el desempeño de los servicios de transporte público contribuyendo al cumplimiento de estas estrategias de acuerdo con uno de sus indicadores que es la incorporación de nuevas metodologías. De igual manera, permite cumplir con las obligaciones establecidas por los reglamentos y estatutos internos de los sistemas analizados en torno al monitoreo y operación eficiente de los sistemas de transporte público ferroviario urbano. Dentro de las limitaciones del marco de políticas identificadas por esta investigación se identifica que las políticas están orientadas únicamente a la evaluación interna, pero hace falta establecer

lineamientos para una evaluación comparativa que permita estandarizar el nivel de desempeño operativo de este tipo de servicios.

De acuerdo con las ventajas que supone la metodología del Data Envelopment Analysis (DEA) como la flexibilidad ante información escasa y su adaptabilidad ante distintos contextos productivos se considera que es una herramienta metodológica adecuada ya que a diferencia de otros métodos como los índices permite tener un entendimiento más completo de la combinación de recursos en el alcance de sus objetivos, por lo tanto, se establece el siguiente marco de actividades:

Actividad 1.1: Establecimiento interinstitucional de la metodología DEA como herramienta para la evaluación y gestión operativa.

Para llevar a cabo esta actividad es importante generar espacios de colaboración entre la Secretaría de Desarrollo Urbano y Territorial, el Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, así como las Direcciones Generales del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y el Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey. Se debe expresar y convenir las ventajas que tiene esta metodología para una evaluación adecuada y factible de estos sistemas. La institucionalización de esta herramienta deberá materializarse en el establecimiento de un convenio de colaboración de los sistemas involucrados, así como su incorporación en los marcos normativos de cada sistema como una de las herramientas para la evaluación de desempeño. El indicador para esta actividad será de carácter binario si se logró establecer en el marco normativo la implementación de esta metodología.

Actividad 1.2: Creación de un organismo técnico de evaluación

La constitución de este organismo debe hacerse involucrando personas expertas en la gestión de los sistemas de transporte público ferroviario y personas expertas en el empleo de la metodología DEA de igual manera se deben de incorporar los Consejos de Administración y las Unidades Administrativas de estos sistemas, así como el consejo consultivo del STC (Metro) dada la naturaleza de sus atribuciones establecidas en las leyes, estatutos y reglamentos correspondientes.

Este organismo puede ser mediado por el Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial. El indicador de esta actividad será compuesto por el resultado de un análisis de actores reconociendo su interés e impacto en el programa. Es importante aclarar que se requiere de alta voluntad política para que pueda ser llevado a cabo.

Actividad 1.3: Identificación y robustecimiento de indicadores para la medición de la eficiencia técnica y construcción de los modelos DEA

Deberá establecerse dentro del marco normativo y el marco de políticas los siguientes indicadores para la evaluación del desempeño de las líneas en relación con su eficiencia:

- Puntuación en el modelo de eficiencia técnica DEA: Representa el nivel de eficiencia técnica relativa logrado, con base en la maximización del volumen de demanda dado sus insumos operativos. Si es igual a 1 la línea es totalmente eficiente, si es menor, la línea presenta áreas de mejora.
- Puntuación en el modelo de eficiencia técnica sostenible DEA: Representa el nivel de eficiencia técnica sostenible relativa logrado con base en la maximización del volumen de demanda dado sus insumos operativos y considerando su impacto ambiental, si es igual a 1 la línea es totalmente eficiente, si es menor, la línea presenta áreas de mejora.

Para llevar a cabo los modelos DEA deberá convenirse la estructura de insumos – productos y productos no deseados. A partir de lo anterior, se propone la aplicación de indicadores establecidos por la ENAMOV y la PNTPCU los cuales son:

- Cantidad anual de pasajeros transportados
- Emisiones indirectas de GEI

En relación con los insumos, se sugieren los indicadores empleados en esta investigación con la finalidad de contribuir a los buscados por la ENAMOV en relación con la caracterización de la flota y rutas y frecuencias operativas. Para lo cual se recomienda el uso de los indicadores capacidad de la flota y frecuencias semanales planificadas respectivamente.

Actividad 1.4: Comunicación y publicación de los resultados obtenidos y su aplicación en la gestión

Se deberá establecer en el marco normativo de los sistemas, así como del organismo evaluador criterios para la publicación de resultados de los modelos DEA elaborados. Deberán ser publicados en espacios que garanticen su fácil acceso y transparencia. Estos resultados deben de ser compartidos con los distintos departamentos operativos de los sistemas y deberán de ser compartidos con las autoridades locales correspondientes, así como con las autoridades federales para garantizar su utilidad en la asignación de presupuesto de forma eficiente.

8.4 Eje 2: Planificación para la inversión estratégica en transporte basada en resultados

Este es sin duda el eje más importante del programa, su finalidad es la aplicación de los resultados del modelo DEA para la planificación de estrategias que permitan mejorar la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano basado en la evidencia empírica. Esta parte del programa está sustentado en los objetivos 2.1.8 y 2.3.10 de la ENAMOV, así como los objetivos 11.1, 9.2, 6.4, 11.2 y 13.1 de la PNTPCU.

De igual manera, se hace altamente relevante debido a que en la ENAMOV se señala como una de las actividades centrales el establecimiento de criterios de priorización para la inversión en los sistemas de transporte a través de recurso federal proveniente de las Aportaciones para la Infraestructura Social (FAIS) y el Programa de Apoyo Federal al Transporte Masivo (PROTRAM).

Para la planificación estratégica se recomienda el uso de los criterios de ineficiencia no radial representados por las holguras (*slacks*) de las líneas los cuales retratan problemas de subutilización de los insumos. Así mismo se recomienda el uso de los resultados del análisis de referencias *Benchmarking* para establecer planes de acción y metas en los niveles de demanda a partir de la comparación entre líneas que permita una clasificación de acuerdo con sus similitudes en las características operativas.

Para establecer los criterios de recomendación con base en los resultados de esta investigación se toma como referencia el análisis de holguras del modelo de eficiencia técnica sostenible que

considera rendimientos variables a escala (VRS) correspondiente al año 2024 debido a que es el más próximo y permite partir de una visión más actualizada de las condiciones del sistema.

Actividad 2.1 Gestión e inversión estratégica en el capital móvil

A partir del modelo DEA se pudo identificar que las líneas que presentan holguras en torno al insumo relacionado con el capital móvil para el año 2024 son las líneas 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, B y 12 del Sistema de Transporte Colectivo (Metro). Por lo cual, el monitoreo de la flota debe realizarse con mayor énfasis en estas líneas a fin de lograr un mayor aprovechamiento de su material rodante. Se proponen las siguientes actividades específicas:

- Elaboración de un diagnóstico de activos basado en el diseño propuesto por Darido *et al.* (2018) priorizando las líneas con presencia de holguras en el cual se evalúe las condiciones de la flota para determinar si el problema de subutilización se debe a problemas de mantenimiento del material rodante. Se deberá verificar la antigüedad, capacidad, configuración, estado y costos potenciales del mismo.
- El segundo paso deberá estar enfocado en la elaboración de una estrategia de mantenimiento, la cual deberá ser estructurada con base al diagnóstico efectuado previamente. Se establecerán enfoques de mantenimiento correctivo y de mantenimiento preventivo a partir de las capacidades técnicas y de profesionalización de los trabajadores de los sistemas.
- El tercer paso deberá ser el establecimiento de un proyecto de inversión estratégico orientado a la flota que esté dirigido al PROTRAM y FAIS en el cual se considere priorizar por un lado las estrategias de mantenimiento correctivo y preventivo para las líneas que así lo requieran, así como reemplazo de unidades según los resultados del diagnóstico inicial. De igual manera, deben contemplarse proyectos de expansión de la flota en las líneas que resultaron eficientes, que tienen un alto nivel de demanda y que presenten problemas de hacinamiento, procurando monitorear que el incremento sea hasta el punto necesario que no afecte su eficiencia por problemas de sobredimensionamiento.

Actividad 2.2 Gestión e inversión estratégica en la infraestructura

En los resultados de holguras que se consideran para la planificación estratégica se encontró que únicamente la línea 1 del STC (Metro) presenta problemas de subutilización de infraestructura en sus estaciones. Como se mencionó en el capítulo de resultados los problemas de ineficiencia de las líneas en general pueden estar vinculados al cierre temporal por remodelación, reparación o mantenimiento de las vías férreas o estaciones, por lo cual se hace necesario la definición de una estrategia de atención a la infraestructura que cuide los niveles de eficiencia de técnica, de modo que se propone la siguiente serie de actividades específicas.

- Elaboración de un diagnóstico de activos enfocado a las estaciones y vías férreas priorizando la línea problemática y siguiendo los criterios establecidos por Darido *et al.* (2018) en donde se valore la calidad de los puntos de acceso a las estaciones, las condiciones de los puntos de transbordo, la calidad de las plataformas y los andenes. Es de vital importancia hacer una valoración de la infraestructura que conecta las estaciones, como pasos elevados, subterráneos y al nivel con el objetivo de evitar incidentes o problemas de rodamiento que afecten la eficiencia de las líneas y pongan en riesgo la seguridad de los usuarios, del personal y de otras personas que transiten cerca de las vías de los sistemas. Es importante de igual forma la valoración de las condiciones de acceso incluso al sistema, para ello es necesario hacer la valoración de las condiciones de rampas, elevadores, guías para personas con discapacidad visual, etc.
- Una vez realizado el diagnóstico de la infraestructura deberá establecerse un plan estratégico de mantenimiento correctivo o preventivo. Es importante que en este plan se considere un cierre estratégico de las estaciones evitando realizar obras que afecten de manera considerable el alcance y el acceso a las líneas y que en consecuencia haya una repercusión negativa en sus niveles de eficiencia. Es por ello por lo que se hace hincapié en el mantenimiento preventivo, no obstante, es imperante que los procesos de remodelación deban realizarse bajo estos criterios.
- Una vez resueltas las actividades anteriores es necesario la construcción de un proyecto estratégico dirigido al PROTRAM y FAIS en el cual se consideren los ajustes a la infraestructura bajos las condiciones antes definidas poniendo especial énfasis en inversión

enfocada a mejorar las condiciones de inclusión de personas con discapacidad o de grupos vulnerables. En relación con proyectos enfocados a la expansión de infraestructura de las líneas debe cuidarse su eficiencia a escala, así como los trayectos redundantes del sistema que puedan afectar la eficiencia técnica global. En este sentido, se recomienda la aplicación de la metodología matemática propuesta por Eraso-Hernandez *et al.* (2024) considerando la topología del sistema y sus criterios de daño acumulado.

Actividad 2.3 Gestión e inversión estratégica en la planificación y capacidad operativa

Las líneas que en las que se identificaron problemas de holguras en las frecuencias semanales planificadas son la línea 1, 3, 5, 6, 8, B y 12 del STC (Metro). Es importante hacer la aclaración de que estos excesos pueden representar una discrepancia entre las características de operación planificadas y las características de operación reales (es decir, viajes planificados que no se llevaron a cabo), debido a que la planificación se realiza con base en la capacidad potencial que tiene cada una de las líneas dado sus insumos, no obstante, en la realidad las condiciones pueden ser subóptimas evitando alcanzar esa capacidad potencial. Sin embargo, esas holguras también pueden responder a una intensidad operativa sobredimensionada con respecto a los niveles de demanda, es decir que haya viajes con pocos usuarios a bordo. Las acciones que se lleven a cabo como consecuencia a la resolución de problemas en la planificación deben considerar que no es deseable un incremento en los intervalos de paso, debe encontrarse una estrategia que permita un reajuste sin afectar el tiempo de espera de los usuarios. Por lo tanto, se proponen las siguientes actividades específicas:

- Llevar a cabo un diagnóstico enfocado a la evaluación de las capacidades operativas de las líneas siguiendo las recomendaciones de Darido *et al.* (2018), debe identificarse en las líneas problemáticas inconvenientes relacionados con el equipo técnico y de infraestructura operativa como los sistemas de distribución eléctrica, los sistemas de señalizaciones, los sistemas de control, los patios de maniobra y los talleres así como todo aquello que tenga impacto en la capacidad operativa de los sistemas afectando el tiempo de traslado de terminal a terminal, el ciclo (tiempo de vuelta), el tiempo de parada o la puntualidad,

elementos que se ven condensados en el intervalo de paso como medida de planificación operativa.

- Elaborar un diagnóstico de los patrones de demanda que permita identificar bajos niveles de usuarios y ocupación de los trenes en periodos determinados y con ello reestructurar los periodos de horas valle y horas punta.
- Presentar de manera más recurrente los criterios de planificación que consideren la constante actualización de las características del servicio de acuerdo con los niveles de demanda dinámicos, así como las capacidades operativas reales.
- Incorporar a los requerimientos de inversión estratégica dirigidos al PROTRAM y al FAIS las necesidades de mantenimiento de los sistemas relacionados con la capacidad operativa en caso de ser necesario.

Actividad 2.4 Planificación estratégica orientada al incremento en la demanda.

Como se dio evidencia en el capítulo de resultados, gran parte de los problemas de ineficiencia pueden estar asociados a problemas en la demanda. Con lo cual se identifican las líneas que tuvieron los niveles más altos de ineficiencia por lo que a través del análisis *benchmarking* se pueden establecer objetivos en el volumen de usuario para estas líneas considerando similitud en sus capacidades operativas con respecto a líneas eficientes. De acuerdo con el análisis *benchmarking* de eficiencia técnica sostenible para 2024 las líneas 8 y B del STC (Metro) podrían aspirar a llegar a niveles de demanda similares a los de la línea 2 del STC (Metro) mientras que las líneas 5,6 podrían potenciar sus niveles de demanda a niveles similares a los de la línea 2 del SITEUR, por otra parte, las líneas 1 y 12 del STC (Metro) pueden buscar lograr niveles de demanda similares a los de la línea 3 del SITEUR. Con respecto a las holguras, no se encontraron deficiencias no radiales en términos de la cantidad de pasajeros transportados, por lo cual el déficit en el producto fue capturado por la eficiencia radial (puntuación de eficiencia).

De acuerdo con las recomendaciones elaboradas por Rivas *et al.* (2019) las políticas de transporte público deben estar orientadas hacia la demanda, lo cual implica, por un lado, establecer políticas de integración modal e intramodal y por el otro implementar políticas de calidad y confiabilidad

del servicio. Para lo cual se establecen tres actividades específicas orientadas de manera prioritaria a líneas que tienen bajos niveles de eficiencia.

- Elaboración de un diagnóstico para tipificar las causas de deficiencias en la demanda en líneas ineficientes. Es primordial analizar los motivos por los cuales las líneas ineficientes presentan problemas en su volumen de demanda. Primeramente, debe considerarse la confiabilidad de las líneas, es decir, incrementar la certeza que tienen los usuarios de que el tiempo de espera para abordar las unidades será el esperado, que el viaje desde la estación de origen a la estación destino será realizado sin inconvenientes y el tiempo de traslado sea adecuado. Así mismo, deberá considerarse el grado de accesibilidad de la línea con cercanías a puntos estratégicos como escuelas, hospitales, centros de trabajo, etc.; el grado de integración modal y la percepción de seguridad, comodidad y calidad. De igual forma, resulta imperante analizar si las alternativas al servicio de estas líneas muestran ventajas en torno a la confiabilidad, accesibilidad, integración modal o experiencia del usuario, como lo pueden ser de líneas del Metrobús, rutas del transporte colectivo o incluso líneas del mismo servicio que logren recorrer el mismo trayecto en menor tiempo y bajo menores tiempos de espera. Se proponen las siguientes herramientas metodológicas a nivel de línea:
 - Análisis de indicadores operativos (puntualidad, siniestros y velocidad)
 - Análisis de cobertura en ratios de influencia
 - Análisis de accesibilidad efectiva
 - Análisis de percepción del servicio
- Implementación de políticas de integración intermodal e intramodal en las líneas donde los problemas de demanda están asociados a inconvenientes de conexión con otros medios de transporte, con el ingreso al sistema como primer modo de transporte o con el nivel de conectividad como línea de ingreso. En relación con la infraestructura puede implementarse cruces seguros, integrar la infraestructura de la línea con las de otro medio de transporte o diseñar proyectos de reconfiguración de trazo e integración de la línea con otras del sistema. También pueden aplicarse políticas de integración tarifaria con énfasis en líneas subutilizadas.
- Diseño de proyectos de tecnología y operación estratégica generados a partir de la integración de la planeación de inversión de los activos (actividades 2.1, 2.2 y 2.3) así como

de estrategias orientadas a su mejor aprovechamiento en la mejora de la confiabilidad velocidad y experiencia del usuario en casos donde estos factores hayan sido identificados como los causantes de los bajos niveles de demanda.

Actividad 2.5 Planificación estratégica orientada a la reducción de emisiones indirectas de GEI.

Con respecto al producto no deseado del modelo de eficiencia técnica sostenible se identificó que, de forma general, los sistemas mejoraron su eficiencia con respecto al modelo de eficiencia técnica, lo que da evidencia que los sistemas de transporte público ferroviario urbano son una modalidad de transporte alineada con los objetivos de la ENAMOV y la PNTPCU. No obstante, las líneas 7 y 8 del STC (Metro) presentaron casos de ineficiencia no radial (holguras) en el año 2024 con respecto a las emisiones indirectas de GEI relacionadas con el consumo eléctrico, esto habla de oportunidades de mejora en torno al impacto ambiental que deben ser priorizadas en estas líneas. Lo anterior se encuentra en sintonía con los indicadores y objetivos propuestos en las políticas anteriormente mencionadas, así como con el marco normativo general que establece el derecho a una movilidad sostenible es decir con el menor impacto ambiental, para lo cual se hace la siguiente propuesta de acciones específicas:

- Elaboración de un diagnóstico técnico que permita determinar las causas de la ineficiencia ambiental en las líneas que presentaron excesos en emisiones. Este diagnóstico debe estar orientado a la evaluación de las condiciones de eficiencia energética operativa de la flota, de los sistemas eléctricos y la calidad de la infraestructura operativa. Con respecto a los primeros, se debe considerar la edad de la flota, su eficiencia energética y su cumplimiento con estándares internacionales rigurosos (alineado con la actividad 2.2). En relación con los sistemas eléctricos debe determinarse de manera particular (y como complemento a la actividad 2.3) su estado físico, caducidad y su eficiencia energética, entre los principales elementos que se deben considerar son las condiciones de las subestaciones eléctricas, la calidad del suministro eléctrico y las pérdidas en transmisión y distribución. En consideración de la infraestructura debe evaluarse si las condiciones de las vías cuentan con las características adecuadas que garanticen su eficiencia (pendientes de aceleración y frenado).

- De acuerdo con los resultados del diagnóstico debe hacerse un proyecto de gestión más adecuado que permita equilibrar de una manera más eficiente la cantidad de personas transportadas y el consumo eléctrico, esto se debe hacer en armonía con la actividad 2.4 en la que la atracción de demanda permita equilibrar su impacto ambiental.
- Debe elaborarse un proyecto de inversión estratégica prioritaria dirigido al PROTRAM y FAIS en las líneas con exceso de emisiones el cual considere a la renovación de la flota así como de los sistemas eléctricos e infraestructura eficiente, es decir, la implementación de material rodante más moderno que tenga características de eficiencia energética más actualizadas, rediseño y remodelación de las vías férreas para mejorar su eficiencia y renovación gradual de los sistemas eléctricos por sistemas más eficientes.

8.5 Eje 3: Implementación de TICs para el mejoramiento de la recolección y procesamiento de datos

En la ENAMOV y la PNTPCU se establecen objetivos específicos orientados a la implementación de Tecnologías de la Información y Comunicación con la finalidad de mejorar el monitoreo de las operaciones de los sistemas de transporte público para mejoras en la gestión y en la experiencia y confiabilidad de los usuarios buscando generar datos e información confiable y actualizable incluso en tiempo real. A partir de lo anterior, queda en evidencia la transversalidad de este eje con los dos anteriores del programa, ya que por un lado se busca mejorar la información que permita alimentar las herramientas metodológicas para la evaluación de la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible y por otro que estas tecnologías impulsen el diagnóstico y uso adecuado de los activos así como incidir en el incremento en el volumen de demanda y reducción de las emisiones de GEI por consumo eléctrico. Para lo cual se proponen las siguientes actividades.

Actividad 3.1 Conversión de sistemas de pago a sistemas de inteligencia operativa

Con la finalidad de generar información que permita conocer las características de uso del sistema se busca la implementación de sistemas inteligentes que aprovechen el uso de tarjetas de pago las cuales hacen posible el seguimiento de los usuarios en el sistema. Esto podría permitir distinguir

puntos de acceso, transbordos, rutas preferidas y tiempos de traslado. Si bien, los sistemas analizados tienen métodos de pago electrónico que permiten determinar puntos de acceso al sistema se pueden implementar una serie de lineamientos que hagan posible mejorar el aprovechamiento de estos instrumentos, para lo cual se hace la siguiente propuesta de actividades específicas

- Implementación de puntos de validación en las salidas del sistema. Actualmente, la información que se registra únicamente se hace a través de los puntos de acceso al momento del pago, incorporar mecanismos de identificación a la salida del sistema permitiría obtener información sobre el trayecto del usuario, como al menos dos líneas tomadas y tiempo de traslado.
- Implementación de un programa temporal de identificación voluntaria en los puntos de transbordo. Se reconoce que la identificación de los usuarios es una actividad que puede interrumpir y extender su tiempo de traslado, por lo cual se propone que por lo menos una vez al año se implementen de forma temporal identificadores en estaciones donde haya transbordos donde sin obligar al usuario se le invite a identificarse con la finalidad de aportar información que permita mejorar el sistema.

Actividad 3.2 Implementación de técnicas de monitoreo GPS y control operativo en tiempo real.

A lo largo de esta propuesta se ha señalado la necesidad de implementar estrategias que permitan la gestión adecuada de los activos y su relación con la mejora en la calidad de los servicios. Los sistemas de transporte público ferroviario requieren sistemas tecnológicos básicos para su operación (Darido *et al.*, 2018) que si bien permiten generar información necesaria para ajustar los planes de operación muchas de esas herramientas se pueden encontrar desactualizadas haciendo que se pierda información relevante, esta actualización está en armonía con los criterios de la ENAMOV y la PNTPCU. Por lo cual se hace la siguiente recomendación de actividades

- Implementación de sistemas operativos inteligentes que permitan conocer la ubicación en tiempo real de las unidades, con énfasis en aquellas líneas donde los sistemas de localización son antiguos y obsoletos. Esta información podría ser compartida con los usuarios con la finalidad de mejorar la confiabilidad del servicio.

- Implementación de sistemas operativos inteligentes que permitan conocer en tiempo real el estado de la flota y de los sistemas operativos, lo cual podría ayudar a identificar fallas potenciales mínimas y de rápida reparación atendiéndolos de manera oportuna sin necesidad de disminuir la capacidad del servicio.
- Implementación de sistemas operativos inteligentes que permitan conocer en tiempo real los niveles de ocupación de las unidades, así como la energía eléctrica consumida con la finalidad de hacer ajustes operativos que incidan directamente en la eficiencia del servicio.

Actividad 3.3 Uso de metodologías analíticas y predictivas para optimizar la operación y evaluación.

Con el creciente desarrollo de la Inteligencia Artificial (IA) y los modelos computacionales de simulación se pueden procesar los datos generados partir de la medición de la eficiencia técnica sostenible así como de los diagnósticos en los activos y los generados por la implementación de nuevas TICs permitiendo modelar simulaciones operativas que hagan posible identificar de manera previa los impactos en la eficiencia de la posible aplicación de ajustes en la operación y cambios en la demanda considerando de manera simultánea el impacto ambiental. El uso de estas técnicas permitirá sacar provecho de la nueva información generada, así como de la información que ya se genera. Se reconoce que invertir en estas herramientas requeriría de grandes sumas de capital, sin embargo, los beneficios potenciales son significativos y a largo plazo podrían contribuir a una gestión técnica y sostenible completamente eficiente en los sistemas de transporte público ferroviario en México.

Conclusiones, recomendaciones y futuras líneas de investigación

Conclusiones

La mejora de transporte público es uno de los ejes pilares relacionados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible en las ciudades, las cuales enfrentan problemas importantes en torno a la movilidad, estos problemas se traducen en congestiones, contaminación y desigualdad, que a su vez causan pérdidas económicas y evitan alcanzar un mayor estado de bienestar. Por sus características, los sistemas de transporte público buscan ser una alternativa a una movilidad asequible, accesible, universal, eficiente con el espacio urbano y favorable con el medio ambiente.

La confiabilidad y la eficiencia son dos características fundamentales de los servicios de transporte público que permiten retener a sus usuarios y atraer nueva demanda, sin embargo, en países en desarrollo, como México, los problemas de operación y administración de estos servicios llevan a que las personas se inclinen por otro tipo de movilidad.

Los nuevos enfoques jurídicos en México han buscado enfatizar en el rol del transporte público como parte fundamental del derecho a la movilidad, la cual ha sido vinculada estrechamente con la accesibilidad, eficiencia, sostenibilidad, calidad, inclusión e igualdad. Esta orientación sobre la movilidad ha permeado en las entidades locales las cuales han tenido que adaptar sus leyes estatales de movilidad de acuerdo con lo que dicta el paradigma jurídico federal. Con ello se han implementado nuevas políticas como la Estrategia de Nacional de Movilidad y Seguridad Vial, la Política Nacional de Transporte Público Urbano, en específico con su tercer eje denominado: la oferta del transporte público colectivo al servicio de las personas, el cual se encuentra vinculado con la evaluación y monitoreo de los servicios de transporte público.

A partir de lo anterior, se establece el rol fundamental de la eficiencia de los sistemas de transporte público dentro de la agenda pública. En específico, los sistemas de transporte público ferroviario urbano han sido destacados como una de las modalidades pilares del transporte público, debido a su alta capacidad operativa, su capacidad de monitoreo y operación, así como su bajo impacto ambiental. Es por ello que se planteó el siguiente objetivo general de investigación: “Explicar cómo el capital móvil, el capital fijo, la capacidad operativa, el volumen anual de demanda y las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) anuales, determinaron la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023- 2024”.

La medición de la eficiencia tiene como base los trabajos de Farrell (1957), los cuales serían complementados por las aportaciones de Charnes, Cooper y Rhodes (1978), y posteriormente con los desarrollos teórico-metodológicos de Banker, Charnes y Cooper (1984), lo que permitió la consolidación de una herramienta aplicable para la evaluación de los servicios públicos por medio de la medición de la eficiencia técnica pura, eficiencia global y eficiencia de escala.

La metodología aplicada en esta investigación fue el Data Envelopment Analysis (DEA), el cual es una herramienta no paramétrica y de frontera, que permite estudiar Unidades de Toma de Decisión en distintos sectores productivos. Una de las principales bondades de esta herramienta metodológica es que no requiere de una gran cantidad de datos para su funcionamiento, lo cual es útil cuando hay poca información disponible, de igual manera permite distinguir, a través del análisis *benchmarking*, las líneas eficientes que fueron tomadas como referencia por parte de las líneas ineficientes, asimismo, hace posible observar holguras (*slacks*), las cuales pueden ser interpretadas como excesos en los insumos y deficiencias en sus productos.

Se realizaron dos enfoques de análisis, uno de eficiencia técnica sin considerar la variable ambiental y otro de eficiencia sostenible considerando una variable ambiental. En ambos se emplearon modelos DEA con orientación hacia los productos considerando rendimientos constantes a escala CRS y rendimientos variables a escala VRS, con lo que se determinó la eficiencia de escala. Las Unidades de Toma de Decisión que fueron consideradas son las 12 líneas del Sistema de Transporte Colectivo (Metro) [STC (Metro)] de la Ciudad de México; las 3 líneas

del Sistema de Tren Eléctrico Urbano (SITEUR) de Guadalajara y; las líneas 1 y 2-3 del Sistema de Transporte Colectivo (Metrorrey) de Monterrey [STC (Metrorrey)]. Se agruparon la línea 3 y 2 de este sistema debido a que tienen un funcionamiento continuo. Se realizaron dos cortes transversales para el año 2023 y el año 2024.

Los insumos, productos y productos no deseados fueron seleccionados con base en la literatura, con especial referencia al trabajo de Taboada y Han (2020) y Zhang *et al.* (2022), los cuales son el referente empírico más próximo a los objetivos de esta investigación. Los insumos constataron de la capacidad de la flota en representación del capital móvil, el número de estaciones en torno al capital fijo, las frecuencias semanales programadas como indicador de la capacidad operativa. El producto seleccionado fue el número de pasajeros transportados durante el año. Para el enfoque que consideró una variable ambiental se seleccionó el producto no deseado de emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero GEI, el cual se obtuvo a través del consumo eléctrico anual total y el factor de emisiones publicado por SEMARNAT.

Los resultados del enfoque de eficiencia técnica sin variable ambiental muestran un comportamiento altamente heterogéneo entre los sistemas de tren urbano analizados, así como de manera interna entre las líneas de un mismo. El análisis desagregado permitió distinguir características particulares entorno a la eficiencia técnica pura y escala de las líneas.

En relación con la eficiencia técnica pura, la cual considera las características de gestión de las líneas dado su tamaño, se pudo identificar que todas las líneas del SITEUR fueron eficientes en su totalidad, lo cual retrata un comportamiento operativo positivo y consistente. Por otro lado, la línea 1 del STC (Metrorrey) mantuvo ineficiencia técnica pura consistente en contraste con la línea 2-3 de su propio sistema, la cual mantuvo eficiencia técnica pura en ambos años. Con respecto al STC (Metro), las líneas 2, 4 y A conservan eficiencia técnica pura en 2023 y 2024. Mientras que la línea 9 sólo en 2023. En contraste, las líneas 5, 6 y B exhiben bajo desempeño persistente, siendo la línea 6 la peor evaluada en cuestión de la eficiencia técnica pura.

A partir un análisis temporal más detallado de la eficiencia técnica pura, se observan caídas importantes en el desempeño de las líneas 1 y 9 del STC (Metro) entre 2023 y 2024. Por otro lado,

las líneas 7 y 12 de este mismo sistema muestran mejoras en sus niveles de eficiencia técnica pura entre 2023 y 2024. Estas caídas y mejoras son congruentes con fenómenos exógenos relacionados con el cierre y apertura de tramos y estaciones.

Las holguras que se repiten con mayor frecuencia son la capacidad de la flota y las frecuencias semanales planificadas. En menor medida se identificaron holguras en el número de estaciones, en particular, en la línea 1 del STC (Metro) y la línea 1 del STC (Metrorrey). Se identificó que la línea 3 del STC (Metro), a pesar de mantener niveles altos de eficiencia técnica pura, presenta amplios márgenes de mejora pues tuvo una importante presencia de holguras.

Las principales ineficiencias a escala que se identificaron fueron en las líneas 4, 9 y A del STC (Metro), las líneas 1 y 2 del SITEUR en 2024 y la línea 2-3 del STC (Metrorrey) en 2023. La línea 4 del STC (Metro) y la línea 2-3 del STC (Metrorrey) presentaron los mayores desajustes a escala. En el caso de la línea 2-3 del STC (Metrorrey) su ineficiencia a escala podría estar asociada a los cierres temporales que se suscitaron en el año 2023.

Las líneas 2 y A del STC (Metro), así como todas las líneas del SITEUR, son empleadas de manera frecuente como referencias de *benchmarking*. Las líneas 2 del STC (Metro), así como la línea 3 del SITEUR resultaron con el mejor desempeño integral al lograr la eficiencia técnica pura total, eficiencia a escala y al ser empleadas como referencia de manera recurrente.

A través del enfoque de eficiencia técnica sostenible, la variable ambiental fue posible hacer evidente que al incorporar las emisiones indirectas de GEI por el consumo eléctrico como un producto no deseado, el SITEUR y el STC (Metrorrey) alcanzan en todas sus líneas la eficiencia técnica pura en ambos años. En el caso del STC (Metro), las líneas 2 y 4 mantienen total eficiencia técnica pura en ambos años, la línea 9 sólo lo consigue en el año 2023. Los resultados ambientales muestran un comportamiento temporal más heterogéneo.

Con el enfoque ambiental también fue posible capturar la caída en la eficiencia técnica pura de las líneas 1, 6, 8 y 9 del STC (Metro) entre 2023 y 2024. Por otra parte, las líneas 7 y 12 del STC (Metro) muestran mejores niveles de eficiencia técnica pura en 2024 con respecto a 2023. La línea

12 pasa de ser la peor evaluada en eficiencia a escala en 2023 a mejorar de forma considerable en 2024.

Resulta relevante mencionar que las emisiones indirectas mostraron holguras en las líneas 3, 7, y 8 del STC (Metro) en 2023 y las líneas 7 y 8 en 2024. Además, se pudo notar que persisten las holguras en capacidad de la flota y frecuencias, se agregan holguras en estaciones en casos específicos.

En términos de escala, la línea 1 del STC (Metro) presenta la mayor ineficiencia durante 2024, consistente con su desempeño en 2023. La línea 12 logra mejorar de manera significativa su eficiencia a escala entre 2023 y 2024.

A través del enfoque ambiental se pudo dar evidencia de que el consumo eléctrico es gestionado de manera cotidiana y sistemática por los operadores del servicio, los cuales realizan los ajustes necesarios de acuerdo con la intensidad de la demanda. Asimismo, el modelo es congruente con la literatura en torno a un comportamiento proporcionalmente homogéneo entre las líneas de los sistemas de tren urbano. De igual manera, las emisiones por pasajero son congruentes con los puntajes de eficiencia técnica pura, con casos excepcionales pero explicables como lo es el caso de la línea 1 del SITEUR.

Además, se explicó la consistencia del modelo con enfoque ambiental ya que fue congruente con diferentes pruebas en las que ese transformó la especificación del modelo. Por lo tanto, se puede constatar que incluir una variable ambiental no contradice el modelo operativo sin ella, sino que lo complementa.

Con respecto a la hipótesis general: “El capital móvil, el capital fijo, la capacidad operativa, el volumen anual de demanda y las emisiones indirectas de Gases de Efecto Invernadero anuales fueron los principales factores que determinaron la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023 y 2024”, se debe mencionar que los modelos DEA, al no ser paramétricos, no permiten negar o confirmar la hipótesis de la investigación. Sin embargo, la congruencia de los comportamientos capturados a

través de los modelos hace, de la combinación de insumos, productos y productos no deseados, una herramienta adecuada para analizar la eficiencia técnica y la eficiencia técnica sostenible.

Con respecto a la hipótesis específica “la capacidad de la flota, el número de estaciones, la frecuencia semanal planificada y la cantidad de pasajeros transportados, fueron los principales insumos y producto que influyeron en la eficiencia técnica de las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 y 2024”, se puede argumentar que esta combinación de insumos y productos permitió evaluar de manera adecuada la eficiencia técnica de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario que fueron analizados. Se distingue el producto de la cantidad de pasajeros como el principal factor que incide en la demanda sobre todo cuando se consideran insumos más permanentes y de planeación a largo plazo.

En relación con la hipótesis específica “la capacidad de la flota, el número de estaciones, la frecuencia semanal planificada y la cantidad de pasajeros transportados fueron los principales insumos y producto que influyeron en la eficiencia técnica de las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 y 2024”, se argumenta que, de acuerdo con la literatura revisada y los resultados del modelo, la incorporación de la variable ambiental de emisiones indirectas de GEI como un producto no deseado permite en efecto medir la eficiencia sostenible de los servicios de transporte público y en específico de los sistemas de transporte público ferroviario urbano.

Por último, de acuerdo con la hipótesis específica que enuncia “la eficiencia técnica sostenible proporcionó un desempeño operativo superior con respecto a la eficiencia técnica en las líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro, del Sistema de Tren Eléctrico Urbano y del Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey en los años 2023 – 2024”, se pudo comprobar, a partir de los resultados de los modelos DEA aplicados, que existen niveles de desempeños contrastantes entre los enfoques de eficiencia técnica y eficiencia técnica sostenible, ya que los niveles de eficiencia mejoraron al considerar la variable ambiental sustentada en el consumo eléctrico, en particular, el SITEUR y el STC (Metrorrey) alcanzaron la eficiencia total en cada una de sus líneas. Lo anterior

retrata que el consumo eléctrico es un insumo del que los sistemas analizados tienen un mayor control ante cambios en la demanda, lo que les permite mantener ciertos niveles de eficiencia, a diferencia de los insumos considerados inicialmente, ya que estos requieren de ajustes en el largo plazo para poder mantener un desempeño eficiente.

En síntesis, la eficiencia de los sistemas de transporte urbano ferroviario no depende de manera exclusiva de su tamaño, de la magnitud de su flota o de su capacidad operativa, sino de su uso efectivo, alineado y proporcional con la demanda. Así mismo, los choques temporales y los fenómenos exógenos logran manifestarse en la eficiencia técnica pura y a escala. Finalmente, la incorporación de una variable ambiental permite generar un entendimiento más integral del desempeño de las líneas y los sistemas.

De manera general, esta investigación concluye que la metodología DEA con rendimientos variables, rendimientos constantes y con la eficiencia de escala, así como la combinación de insumos, productos y productos no deseados seleccionados, permiten una aproximación adecuada al estudio de la eficiencia de los sistemas de transporte público ferroviario urbano de manera desagregada por líneas y hacen posible comparar sistemas con diferentes características desde un enfoque operativo sin variables ambientales y un enfoque con variables ambientales, demostrando ser una metodología viable para la evaluación de su desempeño bajo los criterios de movilidad sostenible.

Recomendaciones

Dada la consistencia y congruencia de los resultados de los modelos DEA con las características de las líneas de los sistemas de transporte público ferroviario urbano en los dos enfoques realizados, se exhorta a los operadores de servicios de transporte público a implementar esta herramienta metodológica como un elemento auxiliar para la gestión adecuada de los sistemas de tren urbano. En el mismo sentido, se hace la invitación a los colegas investigadores a emplear esta metodología como una manera de establecer una postura crítica fundamentada sobre el funcionamiento eficiente y sostenible de los servicios de transporte público en México.

Con base en lo anterior, se recomienda la aplicación de modelos DEA en estos tipos de servicios con la finalidad de coadyuvar en la garantía del derecho a la movilidad sostenible. Este instrumento puede ser aplicado de manera anual con la finalidad de establecer metas de demanda en los servicios de transporte público a través del *benchmarking*, así como para priorizar diagnósticos en determinados insumos operativos en las líneas que presenten holguras. Se sugiere la publicación transparente de los resultados, así como del plan de acción que se construya a partir de los mismos.

Con la finalidad de mejorar el análisis y la evaluación de la eficiencia, se aconseja la implementación de nuevos instrumentos y técnicas que permitan recopilar información adecuada y valiosa para la aplicación de este tipo de modelos. En esta misma sintonía, se invita a la ciudadanía a mantener un monitoreo y demanda constante sobre indicadores y mejora en el desempeño de los sistemas de transporte público desde las dimensiones de eficiencia, accesibilidad, sostenibilidad, calidad, inclusión e igualdad.

Futuras líneas de investigación

Otras líneas de investigación podrían encaminarse a la medición de la eficiencia de los sistemas de transporte público ferroviario en México, implementando indicadores cualitativos de percepción de calidad, seguridad, confiabilidad, accesibilidad y comodidad por parte de los usuarios, con la finalidad de capturar de mejor manera la experiencia cotidiana en el uso de dichos sistemas, ya que estas dimensiones son de especial interés dentro de la agenda pública y que podrían coadyuvar a que el derecho a la movilidad en las dimensiones que se han planteado jurídicamente se vuelvan una realidad.

De igual forma, otra posible línea de investigación se encuentra en realizar modelos DEA actuales de eficiencia operativa y ambiental que compare los sistemas aquí analizados con sistemas de otros países. Sería pertinente una comparativa entre los distintos sistemas de transporte público ferroviario urbano de Latinoamérica, así como una comparativa con los países asiáticos y europeos.

Otra línea posible de investigación es realizar estudios de eficiencia con enfoque multimodal comparando diferentes modos de transporte público que existen en México, como los teleféricos, los autobuses de Tránsito Rápido (BTR), rutas de colectivo, trenes ligeros, trenes interurbanos, entre otros. Lo cual podría aportar información valiosa en la toma de decisiones sobre la oferta de transporte público en el país.

Así mismo, posibles investigaciones que consten de dos etapas serían bastante valiosas, es decir, la aplicación de modelos DEA para determinar los niveles de eficiencia, y posteriormente la aplicación de técnicas paramétricas correlacionales para comprender cuáles son los factores determinantes de esos niveles alcanzados por los sistemas de transporte público.

Referencias

- Aguilar, L. (1992). *El estudio de las políticas públicas*. Miguel Ángel Porrúa.
https://cienciadelapolitica.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/02/luis-aguilar-villanueva_el-estudio-de-las-politicas-publicas.pdf
- Aguilar, L. (1993a). *La implementación de las políticas*. Miguel Ángel Porrúa.
https://cienciadelapolitica.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/02/luis-aguilar-villanueva_la-implementacion-de-las-politicas.pdf
- Aguilar, L. (1993b). *Problemas públicos y agenda de gobierno*. Miguel Ángel Porrúa.
https://negociacionytomadedecisiones.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/04/10001_problemas-publicos-y-agenda-de-gobierno.pdf
- Alanís, R. (2021, febrero 27). Inauguran Línea 3 del Metro en Monterrey. *Milenio*.
<https://www.milenio.com/politica/inauguran-linea-3-del-metro-en-nuevo-leon>
- Alé, J. (1990). Un nuevo esquema de regulación de monopolios naturales. *Estudios Públicos*, 37.
- Alexander, J. (2009). The Concept of Efficiency: An Historical Analysis. En *Philosophy of Technology and Engineering Sciences* (pp. 1007–1030). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-51667-1.50041-0>
- Althaus, C., Bridgman, P. y Davis, G. (2013). *The Australian Policy Handbook*. Allen & Unwin.
- American Public Transit Association (APTA). (1994). *Glossary of transit terminology*. American Public Transit Association. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/4695>
- Anciaes, P. y Alhassan, J. (2024). Chapter Seven – Economic and social impacts of public transport investments: A scoping literature review. En J. Mindell y S. Watkins (Eds.), *Health on the Move 3: The Reviews* (Vol. 13, pp. 227–254). Academic Press.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/bs.atpp.2023.12.002>
- Ander-Egg, E. (1995). *Técnicas de investigación social* (24ª ed.). LUMEN.
- Arana, L. (2025, noviembre 16). Tras tres años, abre por completo la renovada Línea 1 del Metro de la CDMX. *El Universal*. <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/tras-tres-anos-abre-por-completo-la-renovada-linea-1-del-metro-de-la-cdmx/>
- Arévalo, A., Giménez, V. y Prior, D. (2022). Análisis de eficiencia en educación: una aplicación del método StoNED. *Desarrollo y Sociedad*, 92, 45–91. <https://doi.org/10.13043/DYS.92.2>

- Arias, D. y Herrera, H. (2017). *Entre políticas gubernamentales y políticas públicas. Análisis del ciclo de las políticas de desarrollo del gobierno del estado de Michoacán, México, 2003-2010*. Instituto Nacional de Administración Pública. <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/10/4523/14.pdf>
- Arias, J. (2009). *Evaluación de la eficiencia Bancaria en Venezuela desde el Análisis de Fronteras Deterministas (Periodo 2005-2008)* [Tesis de maestría, Universidad del Oriente]. <https://es.scribd.com/document/297509917/EVALUACION-DE-LA-EFICIENCIA-BANCARIA-EN-VENEZUELA-DESDE-EL-ANALISIS-DE-FRONTERAS-DETERMINISTAS-PERI-ODO-2005-2008#page=1>
- Arias-Castrillón, J. (2020). Plantear y formular un problema de investigación: un ejercicio de razonamiento. *Revista Lasallista de Investigación*, 17(1), 301–313. <https://doi.org/10.22507/rli.v17n1a4>
- Arzubi, A. y Berbel, J. (2002). Determinación de índices de eficiencia mediante DEA en explotaciones lecheras de Buenos Aires. *Investigación agraria. Producción y sanidad animales*, 17(1–2), 103–124.
- Awad, F., Graham, D., AitBihiOuali, L., Singh, R., Barron, A. (2023). Benchmarking the performance of urban rail transit systems: a machine learning application. *Transportmetrica A: Transport Science*, 21(1), 698–725. <https://doi.org/10.1080/23249935.2023.2241566>
- Ayaviri, D. y Quispe, G. (2011). Medición de la eficiencia asignativa mediante el análisis envolvente de datos en los municipios de Bolivia. *Perspectivas*, 28, 137–169.
- Banco Mundial. (2025a). *Jobs and Growth Overview*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/topic/jobsandgrowth/overview>
- Banco Mundial. (2025b). *Transport Overview*. World Bank Group. <https://www.worldbank.org/en/topic/transport/overview>
- Banco Mundial. (2025c). *Urban population (% of total population) – Mexico* [Datos tabulados en línea]. Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=MX>
- Banker, R., Charnes, A. y Cooper, W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30(9), 1078–1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>
- Bardach, E. (1977). *The Implementation Game*. Cambridge, MIT Press.

- Batty, P. y Palacin, R. The Circumvention of Barriers to Urban Rail Energy Efficiency. *Urban Rail Transit* 1, 71–77 (2015). <https://doi.org/10.1007/s40864-015-0014-9>
- Blancas, S., Hernández, M. y Arellano, D. (2018). Decisiones e implementación en la construcción de las primeras once líneas de la red del Metro en la Ciudad de México Hacia la desorganización del metro (1967-2000). *Gestión y Política Pública*, 27(3), 89. <https://doi.org/10.29265/gypv.v27i3.450>
- Blanco, V., Conde, E., Hinojosa, Y. y Puerto, J. (2020). An optimization model for line planning and timetabling in automated urban metro subway networks. A case study. *Omega*, 92, 102165. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102165>
- Blomkamp, E., Sholikin, M., Nursyamsi, F., Lewis, J. y Toumbourou, T. (2017). *Understanding policy making in Indonesia: in search of a policy cycle*. <https://www.pshk.or.id/wp-content/uploads/2017/08/Understanding-Policy-Making-in-Indonesia-PSHK.pdf>
- Boame, A. (2004). The technical efficiency of Canadian urban transit systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 40(5), 401–416. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2003.09.002>
- Bogetoft, P. y Otto, L. (2011). *Benchmarking with DEA, SFA, and R* (Vol. 157). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7961-2>
- Bolos, V., Coll-Serrano, V. y Benitez Suarez, R. (2018). deaR: Conventional and Fuzzy Data Envelopment Analysis. En *CRAN: Contributed Packages*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.deaR>
- Bosch, E., Navarro, A. y Giovagnoli, P. (1999). Eficiencia Técnica y Asignativa en la Distribución de Energía Eléctrica: El Caso de EPE SF. *Asociación Argentina de Economía Política*.
- Boussofiane, A., Dyson, R. y Thanassoulis, E. (1991). Applied Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, 52, 1–15.
- Brum, M. y Alves, T. (2022). The efficiency of Brazilian railway system: an application of Data Envelopment Analysis. *REVISTA AMBIENTE CONTÁBIL - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - ISSN 2176-9036*, 14(1). <https://doi.org/10.21680/2176-9036.2022v14n1ID27714>
- Chang-fu, H. y Yuan, X. (2011). Research on the role of urban rail transit in promoting economic development. *Procedia Engineering*, 21, 520–525. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2046>

- Charnes, A., Cooper, W., Lewin, A. y Seiford, L. (1994). *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications*.
- Charnes, A., Cooper, W. y Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Chaverri, P. y Arguedas, A. (2020). Políticas Públicas Basadas en Evidencia: una revisión del concepto y sus características. *Revista ABRA*, 40(60), 49–76. <https://doi.org/10.15359/abra.40-60.2>
- Chu, X., Fielding, G. y Lamar, B. (1992). Measuring transit performance using data envelopment analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 26(3), 223–230. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(92\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0965-8564(92)90033-4)
- Coelli, T., Prasada, D., O'donnell, C. y Battese, G. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis* (2ª ed.). Springer.
- Cohen, E. y Franco, R. (2005). *Gestión Social. Cómo lograr eficiencia e impacto en las políticas sociales*. Siglo XXI, CEPAL.
- Coll, V. y Blasco, O. (2006). *Evaluación de la eficiencia mediante el Análisis Envolvente de Datos. Introducción a los modelos básicos*. Universidad de Valencia.
- Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL). (1994). *El desarrollo del transporte público urbano en América Latina y el mundo*. CEPAL.
- Constitución Política de la Ciudad de México. (2017). *G.O. CDMX 19-12-2025*. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/images/leyes/estatutos/CONSTITUCION_POLITICA_DE_LA_CDMX_14.4.pdf
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. (1917). *DOF 10-04-2026*. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>
- Constitución Política del Estado de Jalisco. (1917). *P.O. 10-12-2014*. <https://www.diputados.gob.mx/bibliot/infolegi/consedos/constitu/jalisco.htm>
- Constitución Política del Estado Libre y Soberano de Nuevo León. (1917). *P.O. 29-05-2023*. [https://www.hcnl.gob.mx/trabajo_legislativo/leyes/pdf/CONSTITUCION%20POLITICA%20DEL%20ESTADO%20LIBRE%20Y%20SOBERANO%20DE%20NUEVO%20LEON.p
df?2023-05-29](https://www.hcnl.gob.mx/trabajo_legislativo/leyes/pdf/CONSTITUCION%20POLITICA%20DEL%20ESTADO%20LIBRE%20Y%20SOBERANO%20DE%20NUEVO%20LEON.pdf?2023-05-29)

- Cook, W., Tone, K. y Zhu, J. (2014). Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. *Omega*, 44, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.09.004>
- Cooper, W., Seiford, L. y Tone, K. (2007). *Data Envelopment Analysis A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DEA- Solver Software* (2ª ed.). Springer.
- Cooper, W., Seiford, L. y Zhu, J. (2011). Data Envelopment Analysis: History, Models, and Interpretations. En W. Cooper, L. Seiford, y J. Zhu (Eds.), *Handbook on Data Envelopment Analysis* (2ª, pp. 1–39). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6151-8_1
- Cravioto, J., Yamasue, E., Okumura, H. y Ishihara, K. N. (2013). Road transport externalities in Mexico: Estimates and international comparisons. *Transport Policy*, 30, 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.08.004>
- Cruz, G., Hernández, S., Torres, G., Arroyo, J. y González, J. (2023). Comportamiento del gasto en transporte de las localidades urbanas y rurales en México. *Notas*, 193(1). <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=541&IdBoletin=194>
- Darido, G., Moody, J. y Jia, W. (2018). Ensuring operational and financial sustainability. En D. Pulido, G. Darido, R. Munoz-Ranskin, y J. Moody (Eds.), *The urban rail development handbook* (pp. 489–521). International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank. <https://cdn.github.org/umbraco/media/2430/rail-handbook.pdf>
- De Almeida, K., De Holanda, L. y De Oliveira, F. (2023). Analysis of spatial–temporal validation patterns in Fortaleza’s public transport systems: a data mining approach. *Data & Policy*, 5, e40. <https://doi.org/10.1017/dap.2023.39>
- De la Lama, P., De la Lama, M. y De la Lama, A. (2022). Los instrumentos de la investigación científica. Hacia una plataforma teórica que clarifique y gratifique. *Horizonte de la Ciencia*, 12(22), 189–202. <https://www.redalyc.org/journal/5709/570969250014/html/>
- Debreu, G. (1951). The Coefficient of Resource Utilization. *Econometrica*, 19(3), 273. <https://doi.org/10.2307/1906814>
- Delfín, O. y Melo, A. (2017). Eficiencia del transporte público en la ciudad de Morelia, Michoacán (México) en el año 2015: un análisis de la envolvente de datos. *Revista Facultad de Ciencias Económicas*, 25(2). <https://doi.org/10.18359/rfce.3066>
- Delfín, O. y Navarro, J. (2014). *La eficiencia de los puertos en México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. (2024). *Transporte Sostenible*. Organización de las Naciones Unidas. <https://sdgs.un.org/es/topics/sustainable-transport>
- Departamento del Distrito Federal. (1967, abril 29). *Decreto de creación del Sistema de Transporte Colectivo*.
- Drucker, P. (2006). *The Effective Executive*. HarperCollins.
- Dumedah, G., Bwire, H., Johnson, A. y Mwauzi, A. (2025). Characterizing and Estimating Operational Cost Elements and Performance Metrics for Public Transport Modes in Sub-Saharan African Cities. *Journal of Sustainable Development*, 18(2), 100. <https://doi.org/10.5539/jsd.v18n2p100>
- Durán, D. (s.f.). *La Línea 1 del Metro: a un año de la reconstrucción*. Tierra Adentro Fondo de Cultura Económica. Recuperado el 26 de abril de 2026, de <https://tierraadentro.fondodeculturaeconomica.com/la-linea-1-del-metro-a-un-ano-de-la-reconstruccion/>
- Eboli, L. y Mazzulla, G. (2012). Performance indicators for an objective measure of public transport service quality. *European Transport*, 51, 1–4. <https://ideas.repec.org/a/sot/journl/y2012i51p4.html>
- Economic and Social Commission for Western Asia (UNESCWA). (2016). *Transport and the Sustainable Development Goals*. https://archive.unescwa.org/sites/www.unescwa.org/files/events/files/transport_and_the_sustainable_development_goals_-_6a.pdf
- Economic Development Research Group. (2020). *Economic Impact of Public Transportation Investment: 2020 update*. <https://www.apta.com/wp-content/uploads/APTA-Economic-Impact-Public-Transit-2020.pdf>
- Eddington, R. (2006). *The Eddington Transport Study: The case for action: Sir Rod Eddington's advice to Government*. http://news.bbc.co.uk/2/shared/bsp/hi/pdfs/01_12_06_eddingtonreport.pdf
- Eraso-Hernandez, L., Riascos, A., Michelitsch, T. y Wang-Michelitsch, J. (2024). Evolution of transport under cumulative damage in metro systems. *International Journal of Modern Physics C*, 35(04). <https://doi.org/10.1142/S0129183124500372>
- Espinoza, E. (2018). La hipótesis en la investigación. *Mendive*, 16(1), 122–139. <https://mendive.upr.edu.cu/index.php/MendiveUPR/article/view/1197>

- Estatuto Orgánico del Sistema de Transporte Colectivo, (2024). *G.O. CDMX 17-9-2024*.
<https://www.metro.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Marco%20Normativo/ESTATUTO%20GACETA.pdf>
- Expert Group for Urban Mobility (EGUM). (2022). *The Context of Public Transport in Europe Public Transport: Introductory Report*. European Comission.
https://transport.ec.europa.eu/document/download/b1157de4-a8a9-44bb-9841-c9a98884582b_en?filename=EGUM%20Recommendations_PT%20Subgroup_Introductory%20Report_Topic%202.pdf
- Faere, R., Grosskopf, S., Lovell, C. y Pasurka, C. (1989). Multilateral Productivity Comparisons When Some Outputs are Undesirable: A Nonparametric Approach. *The Review of Economics and Statistics*, 71(1), 90. <https://doi.org/10.2307/1928055>
- Farrell, M. (1957). The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 120(3), 253. <https://doi.org/10.2307/2343100>
- Fitzová, H., Matulová, M. y Tomeš, Z. (2018). Determinants of urban public transport efficiency: case study of the Czech Republic. *European Transport Research Review*, 10(2), 42. <https://doi.org/10.1186/s12544-018-0311-y>
- Foro Económico Mundial. (2024). *Travel & Tourism Development Index 2024: Interactive data and economy profiles* [Datos en línea]. <https://www.weforum.org/publications/travel-tourism-development-index-2024/interactive-data-and-economy-profiles-afaa00a59c/>
- Førsund, F., Lovell, C. y Schmidt, P. (1980). A survey of frontier production functions and of their relationship to efficiency measurement. *Journal of Econometrics*, 13(1), 5–25. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(80\)90040-8](https://doi.org/10.1016/0304-4076(80)90040-8)
- Førsund, F. y Sarafoglou, N. (2002). On the Origins of Data Envelopment Analysis. *Journal of Productivity Analysis*, 17(1–2), 23–40. <https://doi.org/10.1023/A:1013519902012>
- Fuentes, J. (2003). La evaluación de la actividad docente: un análisis a partir de la técnica DEA. *Economía Mexicana Nueva Época*, 22(1), 137–163. <http://hdl.handle.net/11651/4072>
- Fulton, L., Reich, D. y Romero, E. (2024). *Ciudades Compactadas y electrificadas: México, informe para responsables políticos*. https://mexico.itdp.org/wp-content/uploads/2024/10/23102024_Ciudades-compactas-y-electrificadas-Mexico.pdf
- Gallo, M. y Marinelli, M. (2020). Sustainable Mobility: A Review of Possible Actions and Policies. *Sustainability*, 12(18), 7499. <https://doi.org/10.3390/su12187499>

- Ganga, F., Cassinelli, A., Piñones, M. y Quiroz, J. (2016). Alcances teóricos al concepto de eficiencia organizativa: Una aproximación a lo universitario. *Líder: revista labor interdisciplinaria de desarrollo regional*, 29, 75–97. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7301578>
- Gao, Y. y Zhu, J. (2022). Characteristics, Impacts and Trends of Urban Transportation. *Encyclopedia*, 2(2), 1168–1182. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2020078>
- García, C. (2002). *Análisis de la eficiencia técnica y asignativa a través de las fronteras estocásticas de costes: una aplicación a los hospitales del INSALUD* [Tesis doctoral]. Universidad de Valladolid.
- García-Sánchez, I. (2009). Technical and Scale Efficiency in Spanish Urban Transport: Estimating with Data Envelopment Analysis. *Advances in Operations Research*, 2009, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2009/721279>
- German-Soto, V., De la Peña Flores, A. y García, K. (2023). Desarrollo económico, inversión en transporte y urbanización en México: causalidad y efectos. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales*, 32(63), 67–88. <https://doi.org/10.20983/noesis.2023.1.4>
- Giménez, V. (2001). *La Medida de Eficiencia Operativa de Unidades de Negocio Mediante los Modelos DEA. Una Aplicación al Sector de la Restauración Moderna*. www.euturisme-uab.com/memeutdh.pdf
- Gobierno de la Ciudad de México. (2024a, enero 30). *Reabre Gobierno de la Ciudad de México Línea 12 del Metro, segura y supervisada*. Secretaría de Obras y Servicios CDMX. <https://www.obras.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/reabre-gobierno-de-la-ciudad-de-mexico-linea-12-del-metro-segura-y-supervisada>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2024b, enero 30). *Reapertura de la Línea 12 del Metro*. <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/reapertura-de-la-linea-12-del-metro/>
- Gobierno de la Ciudad de México. (2025). *The Metro System Map*. Agencia Digital de Innovación Pública. <https://mexicocity.cdmx.gob.mx/e/getting-around/the-metro-system-map/?lang=es>
- Gobierno de Nuevo León. (2023, noviembre 11). *Encabeza Samuel García reapertura total de la Línea 2 del Metro*. <https://www.nl.gob.mx/es/boletines/encabeza-samuel-garcia-reapertura-total-de-la-linea-2-del-metro>
- Gobierno del Estado de Jalisco. (2019, octubre 17). Plan institucional del Sistema de Tren Eléctrico Urbano. *Periódico Oficial del Estado de Jalisco*.

- <https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/10-17-19-iii.pdf>
- Gobierno del Estado de Jalisco. (2022). *Plan Institucional del Sistema de Tren Eléctrico y Urbano*. <https://seplan.app.jalisco.gob.mx/biblioteca/archivo/descargarArchivo/3481>
- Gómez, E. (2014). La evaluación de las políticas públicas: perspectivas y propuestas. *Estudios Jaliscienses*, 95, 30–41. <https://www.estudiosjaliscienses.com/wp-content/uploads/2019/06/95-La-evaluaci%C3%B3n-de-las-pol%C3%ADticas-p%C3%BAblicas.-perspectivas-y-propuestas.pdf>
- Guevel, H., Ramón, N. y Aparicio, J. (2025). Benchmarking in data envelopment analysis: balanced efforts to achieve realistic targets. *Annals of Operations Research*, 351(2), 1403–1426. <https://doi.org/10.1007/s10479-024-06216-w>
- GWilliam, K. (2017). *Transport Pricing and Accessibility*. https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2017/07/pricing_and_accessibility-paper_web.pdf
- Hahn, J., Kim, H. y Kho, S. (2009). A DEA Approach for Evaluating the Efficiency of Exclusive Bus Routes. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 7, 227–227. <https://doi.org/https://doi.org/10.11175/eastpro.2009.0.227.0>
- Hassel, A. (2015). Public Policy. En *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 569–575). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.75029-X>
- Henning, T., Dalil, M. y Eun, J. (2011). *A Framework for Urban Transportation Benchmarking*.
- Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ª). McGraw-Hill Education. https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/sites/periodicooficial.jalisco.gob.mx/files/metodologia_de_la_investigacion_-_roberto_hernandez_sampieri.pdf
- Herrera, M., Salas, M., Moreno, J. y Santillán, E. (2025). Gestión de políticas de movilidad sostenible en transporte público: Impacto en la satisfacción del usuario. *Prohominum*, 7(2), 44–54. <https://doi.org/10.47606/ACVEN/PH0332>
- HR Ratings de México. (2020). *Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey*. <https://www.hrratings.com/pdf/Reporte%20Metrorrey%202020.pdf>
- Huang, Y. y Xu, W. (2021). Spatial and temporal heterogeneity of the impact of high-speed railway on urban economy: Empirical study of Chinese cities. *Journal of Transport Geography*, 91, 102972. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.102972>

- Idehlu, H., Ahmed, S. y Noori, M. (2024). Reviewing the Concepts of Productivity Management. *International Journal of Management and Humanities*, 10(8), 1–8. <https://doi.org/10.35940/ijmh.H1702.10080424>
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2019a). *El costo de la congestión: vida y recursos perdidos*. <https://imco.org.mx/costo-la-congestion-vida-recursos-perdidos/>
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2019b). *Índice de movilidad urbana: Barrios mejor conectados para ciudades más incluyentes*. <https://imco.org.mx/indices/indice-de-movilidad-urbana/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). *Transporte urbano de pasajeros* [Datos tabulados en línea]. <https://www.inegi.org.mx/temas/transporteurb/#tabulados>
- Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). (2024). *Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental, ENCIg 2023* [Datos tabulados en línea]. <https://www.inegi.org.mx/programas/encig/2023/#tabulados>
- International Association of Public Transport (UITP). (2023, septiembre 19). *The Role of Public Transport in Achieving the SDGs: A UITP Survey Reveals the Path Forward*. <https://www.uitp.org/news/the-role-of-public-transport-in-achieving-the-sdgs-a-uitp-survey-reveals-the-path-forward/>
- International Transport Workers' Federation (ITF). (2022). *Transport moves the world: ITF global poll 2022*. <https://www.itfglobal.org/en/resources/transport-moves-world-itf-global-poll-2022>
- Intervención General de la Administración del Estado (IGAE). (2007). *Indicadores de Gestión en el Ámbito del Sector Público*. Ministerio de Economía y Hacienda de España.
- Johnson, D., Ercolani, M. y Mackie, P. (2017). Econometric analysis of the link between public transport accessibility and employment. *Transport Policy*, 60, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.08.001>
- Kadyraliev, A., Supaeva, G., Bakas, B., Dzholdosheva, T., Dzholdoshev, N., Balova, S., Tyurina, Y. y Krinichansky, K. (2022). Investments in transport infrastructure as a factor of stimulation of economic development. *Transportation Research Procedia*, 63, 1359–1369. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.146>
- Kerlinger, F. y Lee, H. (2002). *Investigación del Comportamiento* (4ª ed.). McGraw-Hill. <https://padron.entretemas.com.ve/INICC2018-2/lecturas/u2/kerlinger-investigacion.pdf>

- Khursheed, S., Yasmin, S. y Kidwai, F. (2024). The urban metro transit's performance evaluation using SUPER-DEA. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 125, 123–143. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.125.9>
- Klotz, L., Trindade, A. y Varejão, E. (2017). Demand for public transportation and the design of optimal public policies. En *Infrastructure Investments: Politics, Barriers and Economic Consequences* (pp. 121–136). <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/3b7ab2aa-217a-40c9-8de4-5531787ac87a/content>
- Koontz, H., Weihrich, H. y Cannice, M. (2012). *Administración una perspectiva global y empresarial* (14ª ed.). McGraw-Hill.
- Koopmans, T. (1951). An analysis of production as an efficient combination of activities. En T. Koopmans (Ed.), *Activity analysis of production and allocation* (pp. 33–97). Wiley.
- KPMG. (2017). *The true value of local bus services. A report to Greener Journeys*. <https://greener-vision.com/wp-content/uploads/2017/07/The-true-value-of-local-bus-services-June-2017.pdf>
- Lahera, E. (2002). *Introducción a las políticas públicas*. Fondo de Cultura Económica. https://www.ucursos.cl/inap/2016/2/ELE773/1/material_docente/bajar?id_material=1632501
- Lako, A. y Gjevori, S. (2023). Urban Public Transport as a Basis for Sustainable Mobility Development in the Transition from Private Vehicles to Urban Public Transport: A Case Study of Elbasan. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 18(11), 3609–3615. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.181126>
- Lasswell, H. (1951). The Policy Orientation. En D. Lerner & H. Lasswell (Eds.), *The Policy Sciences: Recent Developments in Scope and Method* (pp. 3–15). Stanford University Press.
- Lasswell, H. (1956). *The Decision Process: Seven Categories of Functional Analysis*. University of Maryland Press.
- León, M. y Carriel, V. (2021). Indicadores para medir la movilidad sostenible en espacios urbanos de la sierra ecuatoriana. Caso de estudio el cantón Azogues. *ConcienciaDigital*, 4(1.2), 489–515. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i1.2.1738>
- Ley de Movilidad Sostenible, de Accesibilidad y Seguridad Vial para el Estado de Nuevo León. (2020). *P.O.* 14-II-2025. https://www.hcnl.gob.mx/trabajo_legislativo/leyes/pdf/LEY%20DE%20MOVILIDAD%20

- SOSTENIBLE%2C%20DE%20ACCESIBILIDAD%20Y%20SEGURIDAD%20VIAL%20PARA%20EL%20ESTADO%20DE%20NUEVO%20LEON.pdf?2025-11-14
- Ley General de Movilidad y Seguridad Vial. (2022). *DOF* 29-12-2023. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGMSV.pdf>
- Ley que crea el Organismo Público Descentralizado denominado Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey. (1987). *P.O.* 24-12-2010. https://www.hcnl.gob.mx/trabajo_legislativo/leyes/pdf/LEY%20QUE%20CREA%20EL%20ORGANISMO%20PUBLICO%20SISTEMA%20DE%20TRANSPORTE%20METROREY.pdf?2010-12-24
- Li, H., Yang, W., Zhou, Z. y Huang, C. (2013). Resource allocation models' construction for the reduction of undesirable outputs based on DEA methods. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(5–6), 913–926. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.10.026>
- Li, W. y Yin, S. (2012). Analysis on Cost of Urban Rail Transit. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 12(2), 9–14. [https://doi.org/10.1016/S1570-6672\(11\)60190-6](https://doi.org/10.1016/S1570-6672(11)60190-6)
- Li, Z., Ma, C. y Wu, F. (2020). Operational Efficiency of Multi-System Rail Transit System in Metropolitan Area Based on DEA Model. En *CICTP 2020* (pp. 3434–3445). <https://doi.org/10.1061/9780784482933.296>
- López-Domínguez, M., García de Santiago, D. y Garrido-Vega, J. (2024). *Efectos distributivos de las nuevas políticas para desalentar el uso del vehículo en zonas urbanas de México*.
- López-González, A., Zúniga-González, C., López, M., Quirós-Madrigal, O., Colón-García, A., Navas-Calderón, J., Martínez-Andrades, E. y Rangel-Cura, R. (2016). Estado del arte de la medición de la productividad y la eficiencia técnica en América Latina: Caso Nicaragua. *Rev. iberoam. bioecon. cambio clim.*, 1(2), 76–100. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v1i2.2478>
- Lovell, K. (1992). Production Frontiers and Productive Efficiency. En H. Fried, S. Schmidt, y C. Lovell (Eds.), *The measurement of productive Efficiency: Techniques and applications*. Oxford University Press.
- Łozowicka, A. (2020). Evaluation of the Efficiency of Sustainable Development Policy Implementation in Selected EU Member States Using DEA. The Ecological Dimension. *Sustainability*, 12(1), 435. <https://doi.org/10.3390/su12010435>

- Marín, W. (2022). *Transporte público y heterogeneidad de la informalidad laboral: evidencia para Metrocable Línea J de Medellín* [Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia]. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/95c55f6b-e7e0-4347-a6a0-73e016f7e983/content>
- Martin, K., Lee, K. y Hall, J. (2021). *Public Policy: Origins, Practice, and Analysis*. University of North Georgia. <https://web.ung.edu/media/university-press/public-policy.pdf?t=1661449833017>
- McIntyre, L. (2020). *La actitud científica Una defensa de la ciencia frente a la negación, el fraude y la pseudociencia*. Cátedra. https://www.catedra.com/primer_capitulo/la-actitud-cientifica.pdf
- Merino, M. (2013). *Políticas Públicas. Ensayo sobre la intervención del Estado en la solución de problemas públicos*. Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE). <https://marcelagonzalezduarte.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/01/merino-mauricio-politicas-publicas-2013.pdf>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2025). *Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de acción de mejora de una organización*. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
- Mohieldin, M. y Vandycke, N. (2017). *Movilidad sostenible para el siglo XXI*. Grupo Banco Mundial. <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2017/07/10/sustainable-mobility-for-the-21st-century>
- Mokate, K. (2001). *Eficacia, eficiencia, equidad y sostenibilidad: ¿Qué queremos decir?* (I-24). <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Eficacia-eficiencia-equidad-y-sostenibilidad-%C2%BFQu%C3%A9-queremos-decir.pdf>
- Molinero, M. y Sánchez, A. (1998). *Transporte público: planeación, diseño, operación y administración* (3ª ed.). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Montecinos, E. (2007). Límites del enfoque de las políticas públicas para definir un problema público. *Cuadernos de Administración*, 20(33), 323–335. <https://www.redalyc.org/pdf/205/20503314.pdf>

- Morán, J. (2018). *El municipio como proveedor de servicios públicos en Michoacán: un estudio de la eficiencia a través del Análisis de la Envolvente de Datos (DEA)* [Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo].
- Mukherjee, I., Coban, M. y Bali, A. (2021). Policy capacities and effective policy design: a review. *Policy Sciences*, 54(2), 243–268. <https://doi.org/10.1007/s11077-021-09420-8>
- Navarro, J. (2005). *La Eficiencia del Sector Eléctrico en México*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Navarro, J. (2014). *Epistemología y metodología*. Patria.
- Navarro, J. y Torres, Z. (2007). *Conceptos y principios fundamentales de Epistemología y Metodología*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Nayame, J., Dabab, M. y Anderson, T. (2019). Benchmarking and Evaluating the Efficiency of Mass Transit Systems Based on Best Practice Using Data Envelopment Analysis. *2019 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, 1–8. <https://doi.org/10.23919/PICMET.2019.8893888>
- Norman, M. y Stocker, B. (1991). *Data Envelopment Analysis. The assessment of Performance*. John Wiley & Sons.
- Novaes, A. (2001). Rapid-transit efficiency analysis with the assurance-region DEA method. *Pesquisa Operacional*, 21(2), 179–197. <https://doi.org/10.1590/S0101-74382001000200004>
- Olaya, A. y Gallego, L. (2022). La definición y estructuración del problema público. En S. Leyva y A. Olaya (Eds.), *Modelo para el análisis y diseño de políticas públicas (AMDPP)* (pp. 41–67). Editorial EAFIT. <https://doi.org/10.17230/9789587207743ch2>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (A/RES/70/1)*. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). (2022). *Recommendation of the Council on Public Policy Evaluation*. <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0478>
- Ortegón, E. (2008). *Guía sobre diseño y gestión de la política pública*. Organización del Convenio Andrés Bello, Colciencias, Instituto de Estudios Latinoamericanos de la Universidad de Alcalá.

- https://dmd.unadmexico.mx/contenidos/DCSA/BLOQUE2/PPS/02/PGPS/MA/descargables/U3/guia_gestion_politicas_publicas_ortegon.pdf
- Ortiz, J. (2025). *La eficiencia económica sustentable del sector UPSTREAM de la industria petrolera mundial, 2014-2022* [Tesis doctoral, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. https://drive.google.com/file/d/10X1cY42TRSoq7_aBH8bpNB-DF-U7F_LU/view
- Ortúzar, J. y Willumsen, L. (2011). *Modelling Transport* (4ª ed.). John Wiley & Sons. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119993308>
- Oyón, J. (1999). Transporte público y estructura urbana (De mediados s. XIX a mediados s. XX): Gran Bretaña, Francia y Países Germánicos. *Ecología Política*, 17, 17–35. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=153382>
- Palafox, R. (2024). La informalidad y su relación negativa con el crecimiento económico en México. 2005 Q1-2022 Q1. *Revista de Especializaciones en Políticas Públicas y Desarrollo*, 5(2), 79–98. https://www.depfe.unam.mx/especializaciones/revista/5-2-2024/02_EA-2_Palafox-Silva.pdf
- Pareto, V. (1909). *Manuale di economia politica con una introduzione alla scienza sociale*. Società Editrice Libreria.
- Parkin, M. y Loria, E. (2010). *Microeconomía. Versión para Latinoamérica* (9ª ed.). Pearson Education. <https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w25616w/Microeconomia.%20Novena%20edicion.pdf>
- Parsons, W. (2007). *Políticas públicas: una introducción o lo teoría y lo práctica del análisis de políticos públicas*. Miño y Dávila - FLASCO. <https://freddyaliendre.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/03/parsons-wayne-politicas-publicas.pdf>
- Pérez, J. (2025). *Propuesta estratégica de política pública basada en el Análisis Envolvente de Datos para el control de la contaminación por descargas de aguas residuales en Michoacán, 2022* [Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. https://drive.google.com/file/d/1_Shrp6R4vk_KHZQE_v_pOptg9C6hQrPD/view
- Peters, B. (2021). *Advance Introduction to Public Policy* (2ª ed.). Edward Elgar.
- Polzin, S. (2018). Just Around the Corner: The Future of U.S. Public Transportation. *Journal of Public Transportation*, 21(1), 43–52. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.21.1.5>

- Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo (PNUD). (2025, junio 3). *What is sustainable transport and what role does it play in tackling climate change?* <https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/what-sustainable-transport-and-what-role-does-it-play-tackling-climate-change>
- Prokopenko, J. (1992). *Productivity Management A practical handbook* (2^a ed.). International Labour Organization .
- Pulido, M. (2015). Ceremonial y protocolo: métodos y técnicas de investigación científica. *Opción*, 31(1), 1137–1156. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=31043005061>
- Radlińska, K. (2023). Some Theoretical and Practical Aspects of Technical Efficiency—The Example of European Union Agriculture. *Sustainability*, 15(18), 13509. <https://doi.org/10.3390/su151813509>
- Ray, S. (2004). *Data Envelopment Analysis Theory and Techniques for Economics and Operations Research*. Cambridge University Press.
- Registro Nacional de Emisiones. (2024). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2023*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/896217/aviso_fesen_2023.pdf
- Registro Nacional de Emisiones. (2025). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2024*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/981194/aviso_fesen_2024.pdf
- Reglamento de la Ley de Movilidad de la Ciudad de México. (2017). *G.O. CDMX 19-12-2025*. https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/images/leyes/2025/181225/REG_DE_LEY_DE_MOVILIDAD_DE_LA_CDMX_4.7.pdf
- Reglamento Interno del Sistema de Tren Eléctrico Urbano. (2024). *P.O. 28-11-2024*. <https://apiperiodico.jalisco.gob.mx/api/newspaper/getAsset?q=newspaper/22812/1732828782-2024-11-28-VII.pdf>
- Revuelta, B. (2007). La implementación de políticas públicas. *Dikaion*, 16(1), 135–156. <https://dikaion.unisabana.edu.co/index.php/dikaion/article/view/1379>
- Rivas, M., Suárez-Aleman, A. y Serebrisky. (2019). *Urban Transport Policies in Latin America and The Caribbean*. <https://publications.iadb.org/en/urban-transport-policies-latin-america-and-caribbean-where-we-are-how-we-got-here-and-what-lies>
- Ronit, K. y Porter, T. (2016). Harold D. Lasswell, The Decision Process: Seven Categories of Functional Analysis. En M. Lodge (Ed.), *The Oxford Handbook of Classics in Public Policy*

- and *Administration* (pp. 54–68). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199646135.013.23>
- Rstudio. (2025). *Rstudio*. <https://posit.co/download/rstudio-desktop>
- Ruggiero, J. (2000). Measuring technical efficiency. *European Journal of Operational Research*, 121(1), 138–150. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00010-7)
- Ruiz, A., Olea, F., Flores, A. y García, E. (2023). *A pathway for a green transition of the transport sector in Mexico Feasible interventions that are environmentally, economically, and socially beneficial*. https://es.wri.org/sites/default/files/Issue%20Brief-%20Descarbonizaci%C3%B3n-250923_0.pdf
- Salinas, P. y Cárdenas, M. (2009). *Métodos de Investigación Social*. Editorial Quipus / CIESPAL.
<http://hdl.handle.net/10469/23536>
- Sánchez-Atondo, A., García, L., Calderón-Ramírez, J., Gutiérrez-Moreno, J. y Mungaray-Moctezuma, A. (2020). Understanding Public Transport Ridership in Developing Countries to Promote Sustainable Urban Mobility: A Case Study of Mexicali, Mexico. *Sustainability*, 12(8), 3266. <https://doi.org/10.3390/su12083266>
- Sarmiento, R. y Castellanos, P. (2008). La eficiencia económica: una aproximación teórica. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 4(7), 19–28.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=409634350003>
- Scheel, H. (2001). Undesirable outputs in efficiency valuations. *European Journal of Operational Research*, 132(2), 400–410. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00160-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00160-0)
- Schneider, A. y Ingram, H. (1997). *Policy Design for Democracy*. University of Kansas Press.
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano (SEDATU). (2023). *Estrategia Nacional de Movilidad y Seguridad Vial (ENAMOV) 2023-2042*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/927027/Estrategia_Nacional_de_Movilidad_y_Seguridad_Vial_2023-2042..pdf
- Seiford, L. y Zhu, J. (2002). Modeling undesirable factors in efficiency evaluation. *European Journal of Operational Research*, 142(1), 16–20. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00293-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00293-4)
- Sharaby, N. y Shiftan, Y. (2012). The impact of fare integration on travel behavior and transit ridership. *Transport Policy*, 21, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.01.015>

- Siddiki, S. (2020). *Understanding and Analyzing Public Policy Design*. Cambridge University Press. https://assets.cambridge.org/97811087/39580/excerpt/9781108739580_excerpt.pdf
- Silva, M., Borges, P. y Thanassoulis, E. (2003). Finding Closest Targets in Non-Oriented DEA Models: The Case of Convex and Non-Convex Technologies. *Journal of Productivity Analysis*, 19(2–3), 251–269. <https://doi.org/10.1023/A:1022813702387>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro. (2019, junio 19). *Hace 52 años inició la construcción de la Red del Metro*. <https://www.metro.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/hace-52-anos-inicio-la-construccion-de-la-red-del-metro>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro. (2022). *Parque Vehicular*. <https://www.metro.cdmx.gob.mx/parque-vehicular>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro. (2025a). *Cronología del Metro*. <https://www.metro.cdmx.gob.mx/cronologia-del-metro>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro. (2025b). *Estación por uso y tipo*. <https://www.metro.cdmx.gob.mx/estacion-por-uso-y-tipo>
- Sistema de Transporte Colectivo Metro. (2025c). *Respuesta a solicitud de información sobre intervalos de Paso y Frecuencias desagregadas por línea* (folio 090173725000994) [Documento PDF]. Plataforma Nacional de Transparencia.
- Sistema de Transporte Colectivo Metro. (2025d). *Mapa de La Red*. <https://www.metro.cdmx.gob.mx/la-red/mapa-de-la-red>
- Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey. (2025a). *Respuesta a solicitud de información sobre características de los trenes* (folio 191105825000065) [Documento PDF]. Plataforma Nacional de Transparencia.
- Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey. (2025b). *Inicio*. <https://www.metrorey.mx/>
- Sistema de Transporte Colectivo Metrorrey. (2025c). *Respuesta a solicitud de información sobre tamaño de flota, número de pasajeros, extensión, frecuencias y horarios desagregadas por línea* (folio 191105825000055) [Documento PDF]. Plataforma Nacional de Transparencia.
- Sistema de Tren Eléctrico Urbano. (2025a). *Respuesta a solicitud de información sobre Características de los trenes* (folio 140278925000136) [Documento PDF]. Plataforma Nacional de Transparencia.

- Sistema de Tren Eléctrico Urbano. (2025b). *Respuesta a solicitud de información sobre Intervalo de paso y horarios semanales de servicio desagregado por línea* (folio 140278925000136) [Documento PDF]. Plataforma Nacional de Transparencia.
- Sistema de Tren Eléctrico Urbano. (2025c). *Mi Tren*.
<https://www.siteur.gob.mx/index.php/sistemas-de-transporte/mi-tren>
- Sistema Nacional de Movilidad y Seguridad Vial. (2024). *Política Nacional de Transporte Público y urbano*.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/927027/Estrategia_Nacional_de_Movilidad_y_Seguridad_Vial_2023-2042..pdf
- Sobieralski, J. (2021). Transportation infrastructure and employment: Are all investments created equal? *Research in Transportation Economics*, 88, 100927.
<https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100927>
- Spandou, M. y Macário, R. (2021). *Public Transport's Contribution Toward Achieving the Sustainable Development Goals* (pp. 847–865). https://doi.org/10.1007/978-3-319-95873-6_4
- Statista. (2024). *Public transportation Statics and Facts*. Statista.
<https://www.statista.com/topics/2994/public-transportation/#topicOverview>
- Sujakhu, S. y Li, W. (2020). Public Transit Performance Evaluation Using Data Envelopment Analysis and Possibilities of Enhancement. *Journal of Transportation Technologies*, 10(02), 89–109. <https://doi.org/10.4236/jtts.2020.102006>
- Sun, J., Rosli, A. y Daud, A. (2025). Efficiency analysis of listed pharmaceutical companies in China: A method combining three-stage DEA with undesirable output, PCA, and tobit regression. *PLOS One*, 20(8), e0329767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0329767>
- Taboada, G. y Han, L. (2020). Exploratory Data Analysis and Data Envelopment Analysis of Urban Rail Transit. *Electronics*, 9(8), 1270. <https://doi.org/10.3390/electronics9081270>
- Tamayo, M. (1997). El análisis de las políticas públicas. En R. Bañón y E. Carrillo (Eds.), *La nueva administración pública* (pp. 261–312). Alianza. https://perio.unlp.edu.ar/catedras/pyp/wp-content/uploads/sites/64/2020/03/tamayo_analisis_de_polit_publ.-Capitulo-11-tif.pdf
- Thanassoulis, E. (2001). *Introduction to the Theory and Application of Data Envelopment Analysis*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1407-7>

- To, w., Lee, P. y Yu, B. (2020). Sustainability assessment of an urban rail system – The case of Hong Kong. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119961. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119961>
- TomTom. (2025). *Annual TomTom Traffic Index: Unveiling data-driven insights from over 450 billion miles driven in 2024*. <https://www.tomtom.com/newsroom/press-releases/general/605041959/tomtom-traffic-index-2025/>
- Torres, L. (1991). Indicadores de Gestión para las Entidades Públicas. *Revista Española de Financiación y Contabilidad*, 21(67), 535–558.
- Trillo del Pozo, D. (2002). Análisis económico y eficiencia del sector público. En J. Ruiz-Huerta (Ed.), *VII Congreso Internacional del CLAD sobre la Reforma del Estado y de la Administración Pública*.
- Trompet, M., Anderson, R. y Graham, D. (2009). Variability in Comparable Performance of Urban Bus Operations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2111(1), 177–184. <https://doi.org/10.3141/2111-20>
- Tsai, C., Mulley, C. y Merket, R. (2015). Measuring the Cost Efficiency of Urban Rail Systems: An International Comparison Using DEA and Tobit Models. *Journal of Transport Economics and Policy*, 49(1), 17–34. <https://www.jstor.org/stable/jtranseconpoli.49.1.0017>
- Tsolas, I. (2021). Performance Evaluation of Electric Trolley Bus Routes. A Series Two-Stage DEA Approach. *Infrastructures*, 6(3), 44. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6030044>
- UN-Habitat. (2021). *Urban Indicators Data Base: Urban Transport*. UN-Habitat. <https://data.unhabitat.org/pages/urban-transport>
- Varian, H. (2010). *Intermediate Microeconomics A Modern Approach* (8ª ed.). W. W. Norton & Company.
- Villasís-Keever, M. y Miranda-Novales, M. (2016). El protocolo de investigación IV: las variables de estudio. *Revista Alergia México*, 63(3), 303–310. <https://doi.org/10.29262/ram.v63i3.199>
- Vuchic, V. (2007). *Urban Transit Systems and Technology*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470168066>
- Webster, F. y Bly, P. (1982). The demand for public transport. part II. supply and demand factors of public transport. *Transport Reviews*, 2(1), 23–46. <https://doi.org/10.1080/01441648208716480>

- Wei, R., Liu, X., Mu, Y., Wang, L., Golub, A. y Farber, S. (2017). Evaluating public transit services for operational efficiency and access equity. *Journal of Transport Geography*, 65, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.10.010>
- Wei, Y., Yang, X., Xiao, X., Ma, Z., Zhu, T., Dou, F., Wu, J., Chen, A. y Gao, Z. (2024). Understanding the Resilience of Urban Rail Transit: Concepts, Reviews, and Trends. *Engineering*, 41, 7–18. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.01.022>
- Yao, D., Xu, L. y Li, J. (2019). Evaluating the Performance of Public Transit Systems: A Case Study of Eleven Cities in China. *Sustainability*, 11(13), 3555. <https://doi.org/10.3390/su11133555>
- Yu, Y., You, S., Ye, T., Wang, Y., Guo, X., Chen, W., Liu, T., Wei, S. y Na, Y. (2023). Characteristics and assessment of the electricity consumption of metro systems: A case study of Tianjin, China. *Energy Science & Engineering*, 11(12), 4408–4420. <https://doi.org/10.1002/ese3.1606>
- Yusoff, I., Ng, B. y Azizan, S. (2021). Towards sustainable transport policy framework: A rail-based transit system in Klang Valley, Malaysia. *PLOS ONE*, 16(3), e0248519. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248519>
- Zamora, A. (2018). Logística del comercio internacional de la región de Asia Pacífico a través del Análisis Envolvente de Datos Network. *Contaduría y Administración*, 63(4), 57. <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2018.1359>
- Zaroni, H., De Carvalho, R. y De Pinho, A. (2025). Enhancing sustainable efficiency: applications of data envelopment analysis in ESG performance measurement. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 74(8), 2908–2931. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-10-2024-0728>
- Zhang, C., Juan, Z., Luo, Q. y Xiao, G. (2016). Performance evaluation of public transit systems using a combined evaluation method. *Transport Policy*, 45, 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.10.001>
- Zhang, H., Wang, X., Chen, L., Luo, Y. y Peng, S. (2022). Evaluation of the Operational Efficiency and Energy Efficiency of Rail Transit in China's Megacities Using a DEA Model. *Energies*, 15(20), 7758. <https://doi.org/10.3390/en15207758>
- Zhou, Z. y Liu, W. (2015). DEA Models with Undesirable Inputs, Intermediates, and Outputs. En J. Zhu (Ed.), *Data Envelopment Analysis A Handbook of Models and Methods* (pp. 415–446). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7553-9_15

- Zhu, J. (2009). *Quantitative Models for Performance Evaluation and Benchmarking* (Vol. 126). Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-85982-8>
- Zongbao, F., Yang, L. y Xianguo, W. (2019). A Research on Energy Efficiency Measurement of Urban Rail Transit Based on Dynamic DEA Model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 233, 032024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/233/3/032024>

ANEXOS

Anexo 1. Revisión de la evidencia empírica

Autor	Nombre del artículo	Año	Outputs	Inputs	Tipo de sistema
Chu, X., Fielding, G. y Lamar B.	Measuring Transit Performance using Data Envelopment Analysis	1992	-Ingresos anuales por hora - vehículo.	-Gastos anuales por vehículo -Gastos anuales en mantenimiento -Gastos anuales generales y administrativo -Otros gastos anuales	Sistemas completos de autobuses
Boame, A.	The technical efficiency of Canadian urban transit systems	2004	-Ingreso-vehículo - kilómetros	-Número de autobuses -Consumo de combustible -Trabajadores- horas	Sistemas de autobús
García, I.	Technical and Scale Efficiency in Spanish Urban Transport: Estimating with Data Envelopment Analysis	2009	Vehículo-kilómetros, número de asientos, número de pasajeros, horas de servicio, seguridad, comodidad, acceso y frecuencia	Trabajadores de tiempo completo, consumo de combustible, numero de autobuses	Sistemas municipales de autobuses
Delfin, O., y Melo, A.	Eficiencia del transporte público en la ciudad de Morelia, Michoacán (México), en al año 2015: Un Análisis Envolvente de Datos	2017	Kilómetros que recorre cada unidad, Número de viajes por día	Número de unidades, frecuencia del servicio, Horas de servicio	Rutas de transporte colectivo tipo van
Sujakhu, S. y Li, W.	Public Transit Performance Evaluation Using Data Envelopment	2020	Promedio de pasajeros al día,	Tiempo promedio por viaje redondo, promedio de	Rutas de autobuses

	Analysis and Possibilities of Enhancement		vehículo-kilómetros al día	trabajadores al día, promedio de autobuses al día, número total de paradas	
Wei, R., Liu X., Mu Y., Wang L., Golub A. y Farber, S.	Evaluating public transit services for operational efficiency and access equity	2017	Cantidad diaria de pasajeros	Tiempo total de operación diario, numero de autobuses diarios en operación, combustible consumido diario	Rutas de autobuses
Jin-seok, H., Hye-ran, K. y Seung-young, K.	A DEA Approach for Evaluating the Efficiency of Exclusive Bus Routes	2009	Número de pasajeros, ganancias	Numero de autobuses, longitud de la ruta, número de paradas, intervalos, costos de operación	Líneas de autobuses de tránsito rápido
Tsolas, I.	Performance Evaluation of Electric Trolley Bus Routes. A Series Two-Stage DEA Approach	2021	vehículo-kilómetros, viajes, boletos	tamaño de la flota, horas-trabajo, electricidad	Rutas de trolebuses
Nayame, J., Dabab, M. y Anderson, T.	Benchmarking and Evaluating the Efficiency of Mass Transit Systems Based on Best Practice Using Data Envelopment Analysis	2019	Ingresos totales - vehículo - milla, ganancias, viajes-pasajeros	Horas de trabajo, densidad de la población servida, costos totales de operación	Sistemas de transporte público masivo
Zhang, C., Juan, Z., Luo, Q. y Xiao, G.	Performance evaluation of public transit systems using a combined	2016	Satisfacción del pasajero, ingresos o ganancias	Número de vehículos, número de empleados, subsidio gubernamental.	Diversos sistemas de transporte público
Yao, D., Xu, L. y Li, J.	Evaluating the Performance of Public Transit Systems: A Case	2019	Vehículo-kilómetros, velocidad media,	Longitud de las líneas operativas, subsidios,	Diversos sistemas de transporte público

	Study of Eleven Cities in China		puntualidad , ingresos, pasajeros, satisfacción . Bad outputs: accidentes de tráfico, población, cantidad de vehículos particulares	líneas previas, empleados, vehículos	
Fitzová, H., Matulová, M. y Tomeš, Z	Determinants of urban public transport efficiency: case study of the Czech Republic	2018	Número de pasajeros	Tamaño de la flota, trabajadores, costos energéticos	Diversos sistemas de transporte público
Novaes, A.	Rapid-transit efficiency analysis with the assurance-region DEA method	2001	Pasajeros transportados por año	Longitud total de las líneas, número de estaciones, numero de vagones, longitud promedio de las líneas, intervalo de paso en hora pico, número de empleados	Sistemas de tren de tránsito-rápido
Tsai, C., Mulley, C. y Merket, R.	Measuring the Cost Efficiency of Urban Rail Systems	2015	Vagones-kilómetros, pasajeros	Vagones, empleados, pago de nómina, costo de los vagones	Sistemas de transporte urbano ferroviario
Li, Z., Ma, C. y Wu, F.	Operational Efficiency of Multi-System Rail Transit System in Metropolitan Area Based on DEA Model	2020	Promedio de pasajeros diarios, ingresos por boletaje, desarrollo diario integral de	Número de sistemas, longitud total del sistema, capacidad de traslado diaria, número de estaciones de transferencia, costos diarios de	Multisistemas de transporte ferroviario urbano (ciudades con 3 o más sistemas independientes)

			los recursos	mantenimiento promedio	
Awad, F., Graham, D., AitBihiOuali, L., Singh, R. y Barron, A.	Benchmarking the performance of urban rail transit systems: a machine learning application	2023	Vagones-kilómetros	Número total de trabajadores-hora, flota, longitud de la red	Sistemas ferroviarios urbanos
Khursheed, S., Yasmin, S., Kidwai, y F.	The urban metro transit's performance evaluation	2024	Ratio de interconectividad	Distancia de acceso, frecuencia del metro, tiempo que pasa el pasajero en el tren, distancia de egreso	Estaciones de una línea del Metro
Zongbao, F., Yang, L. y Xianguo, W.	A Research on Energy Efficiency Measurement of Urban Rail	2018	Número de pasajeros, millas recorridas	Consumo energético, consumo de agua	Líneas del Metro por meses del año
Taboada, G. y Han, L.	Exploratory Data Analysis and Data Envelopment Analysis of Urban Rail Transit	2020	Número de pasajeros	Número de estaciones, frecuencias semanales	Líneas de sistemas ferroviarios urbanos

Oscar Misael Mota Pérez

Los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023-2024. Un estudio comparativo de eficiencia técnica...

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:592693357

Fecha de entrega

18 may 2026, 11:57 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

18 may 2026, 12:34 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023-2024. Un estudio compar....pdf

Tamaño del archivo

3.0 MB

250 páginas

77.258 palabras

437.610 caracteres

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de Integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
70 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Políticas Públicas del Instituto de investigaciones Económicas y Empresariales	
Título del trabajo	Los sistemas de transporte público ferroviario urbano en México, 2023-2024. Un estudio comparativo de eficiencia técnica y eficiencia técnica sostenible a través del Data Envelopment Analysis (DEA)	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Oscar Misael Mota Pérez	1901544g@umich.mx
Director	José César Lenin Navarro Chávez	cesar.navarro@umich.mx
Codirector		
Coordinador del programa	Félix Chamú Nicanor	mae.politicas.publicas@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	Sí	Mejorar redacción en ciertas partes

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	Sí	Traducción al inglés para el abstract
Revisión y corrección de estilo	Sí	Adecuar y mejorar estilo
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	Sí	Búsqueda de artículos científicos
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Oscar Misael Mota Pérez
Lugar y fecha	Morelia Mich 14 de mayo del 2026