



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Metodología para el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos para evaluación de operación de tráfico mixto en líneas subutilizadas en México, por medio del estudio del tram-tren de Xalapa, Veracruz

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A

Diana Flores Martínez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. David Camacho Alcocer



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Dedicatoria:

A mi mamá, que desde niña me enseñó el amor por el estudio, la responsabilidad y el amor incondicional

A mi papá, que gracias a su ejemplo sé que los sueños se vuelven realidad con trabajo duro, determinación, y buena voluntad, sin ustedes este sueño jamás hubiera sido posible

A mis tutores, Dr. David Camacho Alcocer, por la oportunidad, paciencia y enseñanzas, gracias a tu esfuerzo y pasión por la ingeniería me inspiras no solo a mí, si no a cientos de jóvenes y;

Al Dr. Abelardo Rodríguez Pretelín, por acompañarte en este camino de tesis de inicio a fin y jamás desistir de apoyarme a pesar de todos mis tropiezos, fuiste una pieza fundamental para lograr la culminación de este gran trabajo

Al Dr. Jaime Paredes Camacho, por haberme invitado a formar parte del mundo de los ferrocarriles, sin usted no hubiera conocido mi pasión por la ingeniería ferroviaria, además de la mano de los mejores.

A Fernando, por alentarme a lograr lo “imposible”, por creer en mi en todo momento y por crecer juntos, jamás habría podido escoger mejor compañero de vida que tú

A mis mejores amigos, por las noches de desvelos, por el apoyo en todos los trabajos, por las risas y vivencia juntos, por las tareas y las fiestas, sin todas esas aventuras mi vida

académica no estaría completa, y puedo decir que me desarrollé como un estudiante pleno y feliz. Especialmente el apoyo académico por parte de Luisito, mi mejor amigo en la universidad y colega, por todos los conocimientos y anhelos que compartimos juntos y a Francia por los días de estrés y planos, gracias por contribuir con tus talentos.

A mi gatita Espuma por su compañía incondicional en esas noches eternas de escribir.

A todas las personas que contribuyeron en poca o gran medida haber llegado hasta aquí.

Agradecimientos:

A la UNAM, por brindarme un lugar seguro y de excelente calidad académica, agradezco el poder representar a la máxima casa de estudios como una “puma”, gracias por todas las becas otorgadas durante mi estancia y por permitirme dos veces haberme formado en el extranjero en UNAM San Antonio y en la Universidad Politécnica de Madrid, gracias por prepararnos para trabajar por bien de nuestro país

A la Facultad de Ingeniería, por velar por sus estudiantes y trabajar para formar Ingenieros de calidad académica y ética

A David Camacho Alcocer y al Dr. Abelardo Rodríguez Pretelín, por brindarme sus conocimientos, tiempo y dedicación, por confiarme la tarea de realizar un estudio de ingeniería de mi amada ciudad Xalapa dándome la oportunidad de aplicar mis conocimientos enriquecidos y desarrollarme como ingeniero civil, gracias por hacerme parte de un proyecto tan importante para mi país

A mis sinodales, por contribuir con sus conocimientos y experiencia a la culminación de este gran trabajo

A la Urb. Rocío Romero Hernández, por ser mi ejemplo de todo lo que hagas sea con la mayor pasión y entrega posible, te admiro y respeto infinitamente

A la Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, por toda la información que me brindó para la realización de este trabajo

Índice

Índice de figuras.....	9
Índice de tablas	12
Lista de acrónimos	14
Introducción.....	16
Capítulo I.- Antecedentes y contextualización	20
I.1 Descripción de los retos.....	21
I.2 Hipótesis	23
I.3 Objetivos.....	23
I.3.1 Objetivo general.....	23
I.3.2 Objetivos específicos.	23
I.4 Justificación	24
I.5 Descripción y alcance del proyecto	25
I.6 Uso del tram-tren en otros países y su adopción en México	28
I.6.1 Uso mixto de la red ferroviaria	36
I.6.2 Trenes de pasajeros que actualmente funcionan en México	42

I.6.3 Trenes de pasajeros en desarrollo en México	57
I.7 Contexto de la Región de Xalapa, Veracruz.....	59
I.8 Descripción de la propuesta del proyecto del Tren Ligero de Xalapa.....	72
I.6.1 Estaciones del proyecto del Tren Ligero de Xalapa	78
Capítulo II.-Marco Teórico.....	83
II.1 Capacidad ferroviaria	84
II.1.1 Factores que afectan la capacidad ferroviaria.....	85
II.1.2 Tipos de capacidad ferroviaria.....	91
II.2 Metodologías para el análisis de capacidad ferroviaria.....	94
II.2.1 Métodos analíticos	95
II.2.2 Métodos de optimización.....	99
II.2.3 Métodos de simulación	100
Capítulo III.- Metodología para el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos	102
III.1 Descripción de la metodología.....	103
III.1.1 Limitaciones y consideraciones previas	107
III.1.2 Ecuaciones propuestas.....	112

Capítulo IV.-Desarrollo de la metodología en el caso particular de Xalapa	120
IV.1 Obtención de la información.....	121
IV.1.2 Material rodante	123
IV.1.3 Operación	123
IV.2 Aplicación de las ecuaciones propuestas	129
IV.2.1 Método tradicional	130
IV.2.2 Método AAR 2011	131
IV.2.3 Método AAR 2019	132
IV.2.4 Método INECO	133
IV.2.5 Método USR.....	134
IV.3 Presentación de resultados	136
IV.4.- Comparativa entre características iniciales de diseño operativo y resultados analíticos	140
Capítulo V.- Análisis de resultados y discusión	144
Capítulo VI. - Conclusiones y panorama futuro	158
Referencias.....	166

Índice de figuras

Figura 1	<i>Situación actual de la línea férrea de Xalapa.....</i>	26
Figura 2	<i>Metro en diferentes ciudades del mundo: Ciudad de México, Nueva York y Tokio</i>	30
Figura 3	<i>Tranvía en Oporto, Portugal.....</i>	31
Figura 4	<i>Tren ligero de la Ciudad de México. Xochimilco-Taxqueña</i>	32
Figura 5	<i>Ejemplos de interoperabilidad de un sistema ferroviario.....</i>	38
Figura 6	<i>Gráfico de comparación de transporte de pasajeros por hora en diferentes sistemas de transporte.</i>	41
Figura 7	<i>Sistema de transporte del Tren Suburbano de la Ciudad de México.....</i>	48
Figura 8	<i>Tren turístico Cholula-Puebla</i>	51
Figura 9	<i>Tren turístico Chihuahua- Pacífico.....</i>	52
Figura 10	<i>Tren turístico Tequila-Express.....</i>	53
Figura 11	<i>Tren turístico Tijuana-Tecate.....</i>	54
Figura 12	<i>Capacidad de la infraestructura de acuerdo con el modo de transporte .</i>	56
Figura 13	<i>Localización Geográfica del Tren Maya</i>	58

Figura 14	<i>Etapas del proyecto del Tren Maya</i>	59
Figura 15	<i>Localización Geográfica del Estado de Veracruz.....</i>	61
Figura 16	<i>Mancha urbana de Xalapa, línea férrea y etapas del proyecto</i>	62
Figura 17	<i>Densidad de la ciudad de Xalapa</i>	64
Figura 18	<i>Grado de marginación de la zona metropolitana de Xalapa.....</i>	67
Figura 19	<i>Población económicamente activa en la zona conurbada de Xalapa.....</i>	69
Figura 20	<i>Trazo del ferrocarril y las estaciones propuestas del Tren Ligero de Xalapa</i>	75
Figura 21	<i>Irregularidades en el trazo férreo de Xalapa. Situación actual de la línea V utilizada como andador peatonal y algunas viviendas irregulares al costado de la línea con deterioro ambiental.</i>	77
Figura 22	<i>Fases del proyecto del Tren Ligero de Xalapa.</i>	79
Figura 23	<i>Estaciones propuestas del Tren Ligero de Xalapa.....</i>	81
Figura 24	<i>Parámetros que afectan la capacidad ferroviaria.</i>	86
Figura 25	<i>Correlación entre la capacidad teórica y la confiabilidad.....</i>	93
Figura 26	<i>Explicación gráfica de un cantón ferroviario</i>	97
Figura 27	<i>Gráfico de características mínimas entre trenes</i>	99

Figura 28	<i>Diagrama de flujo para el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos.</i>	106
Figura 29	<i>Propuesta de estaciones para trenes de pasajeros</i>	127
Figura 30	<i>Esquema de la división de catones del Tren Ligero de Xalapa</i>	128
Figura 31	<i>Porcentaje de movimiento de los trenes de carga de acuerdo con los horarios de operación, de acuerdo con el registro de KCSM 2018-2019</i>	148
Figura 32	<i>Número de trenes que circularon en el año 2018-2019 respecto al día de la semana</i>	149
Figura 33	<i>Longitud de los trenes de carga que operan en el tramo de Xalapa</i>	150
Figura 34	<i>Horario de 6:00 a 7:30 del Tren Ligero de Xalapa, con frecuencia de 15 min</i>	153
Figura 35	<i>Horario de 6:00 a 7:30 del Tren Ligero de Xalapa, con frecuencia de 15 min, aplicando propuestas de operación</i>	154
Figura 36	<i>Propuesta de solución de ladero extendido en las estaciones Jardines de Xalapa con Plaza Cristal</i>	155

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Modalidades del transporte de pasajeros en el Sistema Ferroviario Mexicano</i>	43
Tabla 2	<i>Volumen mensual de pasajeros transportados por ferrocarril en el 2019</i>	45
Tabla 3	<i>Volumen anual de pasajeros transportados por ferrocarril, periodo 2008-2019</i>	46
Tabla 4	<i>Datos e información mínima necesaria de la infraestructura para aplicación del cálculo de capacidad ferroviaria</i>	108
Tabla 5	<i>Datos e información mínima necesaria del material rodante para la aplicación del cálculo de capacidad ferroviaria</i>	109
Tabla 6	<i>Datos e información mínima necesaria de la operación ferroviaria para el cálculo de capacidad de vía ferroviaria.....</i>	111
Tabla 7	<i>Datos de la operación de acuerdo con el Perfil del Tren Ligero de Xalapa</i>	122
Tabla 8	<i>Datos del material rodante de acuerdo con el Perfil del Tren Ligero de Xalapa</i>	123
Tabla 9	<i>Distancia de las estaciones propuestas del Tren Ligero de Xalapa.....</i>	125
Tabla 10	<i>Datos de la operación de acuerdo con el Perfil del Tren Ligero de Xalapa</i>	129

Tabla 11	<i>Capacidades ferroviarias obtenidas en la línea de Xalapa por diferentes métodos analíticos.</i>	137
Tabla 12	<i>Capacidad ferroviaria obtenida para el tren Ligero de Xalapa por el método. USR.</i>	139
Tabla 13	<i>Tiempo en minutos que podrá circular cada tren por sentido en la vía de Xalapa de acuerdo con cada ecuación.</i>	142

Lista de acrónimos

American Association of Railroads (AAR)

Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (ARTF)

Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles (CAF)

Fondo Nacional del Turismo (FONATUR)

Índice de Movilidad Urbana (UMC)

Ingeniería y Economía del Transporte (INECO)

Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO)

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)

Servicio Ferroviario Mexicano (SFM)

Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC)

Ferrocarriles Mexicanos (Ferromex)

Kansas City Southern in México. (KCSM)

United States Railroad Administration (USRA)

Universidad Veracruzana (UV)

Introducción

Los ferrocarriles en el mundo han significado crecimiento, avance tecnológico y poder económico en las naciones. México no ha sido la excepción, al participar activamente como centro logístico internacional dentro de la región de América del Norte. Parte importante de este esfuerzo ha sido el transporte de mercancías y productos, en el cual, México se ha ubicado como el onceavo país con mayor tráfico ferroviario de carga dentro de un contexto internacional. (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, [ARTF]. 2020). Este impulso se fortaleció a partir de la concesión de la red ferroviaria mexicana, que se encuentran operando bajo el sistema de concesión, por lo que la infraestructura ferroviaria nacional se enfocó al uso exclusivo de trenes de carga.

Lamentablemente, el enfoque que se le dio a los ferrocarriles, desde un aspecto puramente financiero dio prioridad a sistemas de carga, generando la desatención y posterior desaparición del servicio ferroviario de pasajeros. En tiempos recientes, a través de los proyectos federales y la planeación a largo plazo propuesta desde el gobierno federal, se ha visto una reactivación e interés renovado en este tipo de servicios, por ejemplo, en 2008 con el tren Suburbano que conecta a la Ciudad de México con el Estado de México o los proyectos en estudio como el tren suburbano de Villa García-Aeropuerto en la ciudad de Monterrey, o el Tren Ligero de Xalapa, del cual desde el 2020 se firmó un convenio de colaboración entre el Gobierno del Estado de Veracruz y la ARTF con el fin de establecer el comité técnico consultivo que permita planear, implementar y ejecutar la construcción del proyecto (Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2020), esto solo por mencionar algunos ejemplos.

El interés renovado en trenes de pasajeros es debido a los altos índices de congestión vehicular en muchas ciudades de nuestro país y del mundo, la gran contaminación derivada de los automóviles y la accidentalidad concurrente ,convirtiendo al tren en una gran alternativa de transporte, confiable para mitigar problemas de movilidad, seguro y además de preservar el ambiente, por lo que las tendencias mundiales en pro de la sostenibilidad apuntan a invertir en estos proyectos por el alto valor económico que proveen a las ciudades, siendo Europa y Asia las dos regiones con más trenes de pasajeros en el mundo, sin embargo México y América Latina empieza a reinvertir en trenes de pasajeros debido a que el tren es el medio de comunicación en los países de primer mundo, por su alta eficiencia y sostenibilidad. (Camacho, 2022).

Si bien el costo de inversión inicial que se debe realizar para la construcción de nueva vía férrea, pudiera representar una aparente desventaja sobre otros sistemas de transporte como Metrobús o flotas de autobuses, la realidad es completamente diferente, ya que los trenes resultan más redituables a mediano y largo plazo por ejemplo transportan un mayor número de pasajeros por hora, lo que genera una mejor relación calidad-precio y por lo tanto un menor costo de operación, ya que se requiere menos conductores y unidades para el mismo número de pasajeros, además los trenes ligeros cuentan con una vida útil de hasta 30 años, casi el doble que los autobuses, generando una disminución en el mantenimiento y baja reinversión del material rodante. Los trenes de pasajeros además estimulan la inversión sobre sus áreas de influencia, generan plusvalía de la tierra, gracias a la longevidad y durabilidad con la que cuentan los proyectos ferroviarios permitiendo a empresas invertir de manera segura en proyectos a largo plazo, por ejemplos desarrollo de plazas comerciales, zonas habitacionales, etc. reflejándose de manera positiva en la macroeconomía del lugar. A pesar de todas estas

ventajas, la inversión inicial aún puede significar un impedimento al desarrollo de trenes de pasajeros, es por lo que surge la propuesta de integrar el servicio de pasajeros en vías ya existentes operadas con trenes de carga, coexistiendo y operando los dos sistemas de manera segura, esto se da con el propósito de amortiguar los costos iniciales de construcción de vía nueva, poniendo en completa competitividad al tren de pasajeros a comparación de los otros sistemas de transportes desde el punto de vista económico.

Debido a la expectativa que genera la posibilidad de integrar el sistema de transporte de pasajeros en un sistema compartido con transporte de carga, se requiere de una evaluación de capacidad ferroviaria preliminar, que se logra al emplear métodos analíticos que permiten calcular el número de trenes que pueden circular sobre una vía y con esto determinar la factibilidad técnica de la infraestructura existente, así como identificar las posibles problemas que presente la red y generar propuesta de optimización y/o mejora como incorporación de doble vía, creación de laderos, mejoras a la operación, sistemas de control más eficientes, entre otros, que permita incorporar un tren de pasajeros de la manera más segura. De resultar factible la incorporación de un tren de pasajeros por estos métodos preliminares es una garantía que se pueda continuar con estudios más detallados y costosos, que nos den un mayor nivel de profundización y exactitud, estos estudios son más costosos y tardados, pero el costo estaría justificado y respaldado por este estudio previo.

La metodología desarrollada durante esta investigación se basa en diferentes métodos analíticos, generando propuestas para mejorar la operación del sistema, valorar el aumento de capacidad y parámetros necesarios para un servicio eficiente.

Con esta tesis se evalúa la capacidad ferroviaria del proyecto del Tren Ligero de la Región de Xalapa y las necesidades que presenta el sistema para la implementación de un tren de pasajeros; a la par se desarrolla una metodología general que pueda ser aplicada para distintos tramos ferroviarios con potencial de introducir un sistema de tren de pasajeros en el país, esta metodología busca de manera confiable, rápida, y sencilla determinar la capacidad ferroviaria preliminar así como identificar las necesidades y proponer soluciones para implementar trenes de pasajeros en ciertas vías subutilizadas en varias regiones de México y el mundo, generando que se puedan tomar decisiones en un lapso corto de tiempo y con la menor cantidad de recursos posibles.

Se espera que el análisis de este proyecto reafirme el renovado interés de integración de trenes de pasajeros en México, facilitando estudios preliminares en varias regiones del país o distintas ciudades del mundo con características similares a Xalapa, que requieren un transporte ferroviario para dar solución a su problema de movilidad, con esta primera aproximación además de determinar la factibilidad técnica se generan pautas para continuar con estudios económicos que permitan robustecer el proyecto por medio del cálculo de costo de las propuestas aquí presentadas y determinar su viabilidad económica.

Capítulo I.- Antecedentes y contextualización

1.1 Descripción de los retos

En los últimos años los gobiernos han apostado por darle preferencia al autotransporte sobre los otros modos sin importar las consecuencias negativas que este ha traído a las ciudades. Hoy en día la necesidad de desplazar un mayor número de personas y reducir la huella de carbono vuelve indispensable invertir en proyectos ferroviarios que generan un menor impacto ambiental y un mayor rendimiento. Un punto clave en la introducción de trenes pasajeros es la existencia de líneas férreas a lo largo del país, que cruzan ciudades y que se encuentran poco utilizadas o subutilizadas por trenes de carga, dando oportunidad a la introducción de trenes de pasajeros de manera segura y reduciendo los costos de inversión inicial. De esta manera se aprovecha la infraestructura existente a la par de dar solución al problema de movilidad.

El parámetro de capacidad ferroviaria sirve para determina cuantos trenes pueden circular de manera óptima en una vía en un intervalo de tiempo determinado, cumpliendo con ciertas características de operación. Este parámetro es indispensable para determinar las condiciones mínimas seguras de la vía para que la operación mixta sea posible.

La operación mixta permite que distintas clases de trenes operen sobre una misma línea férrea de manera segura, por ejemplo, la operación de trenes de carga con trenes de pasajeros. La operación ferroviaria mixta es un sistema exitoso que funciona desde hace varios años en diferentes partes del mundo sobre todo en Alemania, España, Estados Unidos y Canadá, solo por mencionar algunos ejemplos, por lo que en Latinoamérica se quiere empezar apostar por este modo de transporte.

En México los sistemas ferroviarios de pasajeros solo se han implementado en las grandes Ciudades en forma de metro como lo son Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, pero los problemas de movilidad no son exclusivos de estas grandes urbes. Las ciudades medianas como Xalapa presentan grandes problemas de movilidad. En Xalapa existe una línea férrea subutilizada para trenes de carga la cual atraviesa la ciudad de norte a sur y es coincidente con puntos de alta atracción de viajes, además de que Xalapa y su zona conurbada posee alta densidad de automóviles haciendo tiempos de viajes comparables a las grandes metrópolis, por lo que la implementación de un tren daría la solución a la movilidad y mejoras el entorno.

Desafortunadamente no se han implementado este tipo de proyectos en México, por la falta de estudios que existen para determinar la capacidad ferroviaria y por lo tanto las condiciones idóneas para la operación mixta siguen representando un obstáculo. Por lo que con este estudio se propone una metodología para el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos que nos dé el escenario idóneo para la operación mixta segura en líneas subutilizadas en todo el país con características similares a Xalapa, obteniendo una capacidad ferroviaria preliminar.

Gracias a los estudios de capacidad ferroviaria podemos diseñar un proyecto de manera adecuada sin sobredimensionamientos que se traducen a sobrecostos siempre priorizando la seguridad. Sin este tipo de estudios resulta imposible desarrollar proyectos ferroviarios seguros y eficientes, generando que el sector ferroviario de pasajeros se vea detenido. Esta tesis nos brinda un panorama positivo sobre la ejecución de este tipo de proyectos.

I.2 Hipótesis

Determinar cuál es el escenario mínimo para que la operación mixta sea posible en Xalapa y en líneas ferroviarias con características similares.

I.3 Objetivos

I.3.1 Objetivo general

Proponer una metodología, para su uso a nivel nacional, para el cálculo de capacidad preliminar de vía mediante la comparación de distintos métodos analíticos, con base en las características propias del proyecto, así como del contexto nacional ferroviario, por medio del análisis y evaluación del proyecto de Tren Ligero de la región de Xalapa, Veracruz, México.

I.3.2 Objetivos específicos.

- Evaluar la capacidad de vía del proyecto de Tren Ligero de la región de Xalapa, Veracruz, con base en el escenario actual, a través de distintas metodologías utilizadas a nivel internacional.
- Analizar y evaluar la capacidad de vía del tramo Terminal Banderilla-Terminal Velódromo de 17.8 km en la ciudad de Xalapa, Veracruz considerando un escenario de uso mixto de la vía debido a la implementación de un servicio ferroviario de transporte de pasajeros. Basado, en métodos de tipo analítico.

- Proponer soluciones y/o alternativas que permita la optimización de la capacidad de vía en el tramo Banderilla-Velódromo del servicio de Tren Ligero de la región de Xalapa, Veracruz.

1.4 Justificación

Ante los problemas de movilidad que presentan distintas ciudades de México y la propuesta de mitigarse por medio de trenes de pasajeros, se vuelve indispensable crear metodologías que integren sistemas seguros y eficientes, ya que en muchas ocasiones se han integrado trenes de pasajeros sin pasar por sus debidas etapas de desarrollo de manera adecuada, generando ineficiencias en su implementación, sobre dimensionamientos y por lo tanto sobre costos. Resulta de especial interés conocer cuáles son las características mínimas con las que debe contar una vía desde el punto de vista técnico para cumplir sus objetivos.

La presente investigación propone una metodología para el cálculo de capacidad ferroviaria, así como la determinación de propuestas mínimas a mejoras de operación, infraestructura o material rodante, para la integración segura de un tren de pasajeros en un sistema compartido con trenes de carga, esta metodología es desarrollada a la par con el caso de estudio de Tren Ligero de Xalapa, con el que se ejemplifica mejor los pasos a realizar.

La investigación busca proporcionar información que será útil a la comunidad ferroviaria para mejorar el conocimiento en capacidad de vía por métodos analíticos y dará pauta para el desarrollo de estudios de factibilidad económica, complementando la determinación de un proyecto factible técnica y económicamente.

Debido a que no se cuenta con suficientes estudios de alcance nacional para la determinación de capacidad ferroviaria, además de una inexistente metodología que facilite determinar las características mínimas para la integración segura de un tren de pasajeros en sistema mixto, el presente trabajo es conveniente para afianzar un mayor conocimiento sobre estas características mínimas con las que debe contar una red ferroviaria para introducir sistemas de pasajeros y tren de carga.

Por otra parte, la investigación contribuye a ampliar la posibilidad de implementar trenes de pasajeros de manera más sencilla y disminuyendo posibles errores en su integración que encarecen los proyectos significativamente, los errores se traducen en pérdidas monetarias, por lo que es importante seguir un adecuado proceso. Los resultados obtenidos en este estudio fueron contrastados con los obtenidos por Mauricio Villareal en el 2020, para el mismo caso de estudio del Tren Ligero de Xalapa, pero que fue desarrollado por métodos de simulación mediante el programa Railsys, generando una primera línea de investigación. Es importante mencionar que este estudio podrá ser complementado con futuras investigaciones acerca de factibilidad económica y social, del cual no fue alcance de esta investigación, pero resulta de suma importancia para implementar un proyecto ferroviario exitosamente.

1.5 Descripción y alcance del proyecto

En el caso particular de Xalapa, ciertas secciones a lo largo del trazo existente de la vía se encuentran actualmente abandonadas, poco utilizadas y con señalización deficiente en los cruces a nivel. Esto conlleva a situaciones de peligrosidad para los habitantes debido a que estas zonas funcionan como centros de reunión para grupos criminales o como focos de infección ya que son utilizadas como tiraderos de basura, tal como puede apreciarse en la

Figura 1. En la imagen de la izquierda se aprecia que a lo largo del trazo en el derecho de vía se han asentado viviendas irregulares. Además, debido al escaso mantenimiento se producen inundaciones en varias zonas de la red por falta de drenaje y acumulación de basura. En la imagen de la derecha se observa que debido que falta de señalización y educación vial genera que los automovilistas invadan la zona de cruce ferroviario, implicando una constante probabilidad de ocurrencia de accidentes por choque.

Figura 1

Situación actual de la línea férrea de Xalapa



Fuente: Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2019.

Estas problemáticas, que no son exclusivas de esta región, sino que se replican en distintas partes de México, pueden apostar por la alternativa de implementar un tren de pasajeros reduciendo o incluso eliminando todas las problemáticas antes expuestas. Por ejemplo, la implementación de un proyecto de un tren de pasajeros implica devolver a la población estas zonas para su uso como espacio público logrando esto a través de la implementación de medidas de seguridad, iluminación, adecuada señalización, zonas de recreación como: parques, ciclovías, áreas peatonales, entre otras.

La integración de un tren ligero requiere además de estudios de carácter técnico con los cuales se garantice una correcta operabilidad y seguridad al sistema. Uno de estos estudios es el “Análisis de capacidad ferroviaria”. En este tipo de estudios se evalúa la capacidad ferroviaria del sistema, medido como el número máximo de trenes que pueden circular sobre una línea o tramo ferroviario, por sentido, en un horario determinado, esto expresado a través de un horario el cual indique la posesión física de la línea en función del tiempo. Para lograr este objetivo, se optimiza el uso de la infraestructura actual, o se propone la construcción de nueva infraestructura ferroviaria como laderos, nuevos tramos ferroviarios o doble vías.

El cálculo de capacidad ferroviaria busca hacer eficiente y segura la integración de un tren mediante la generación de propuestas para la planeación y su viabilidad técnica. Por lo que un estudio de análisis de la capacidad de vía es un requisito indispensable para conocer si el proyecto satisface las demandas de transporte en la región, además de otorgar una operación segura y accesible. (Márquez G. Vega L,2010)

Para lograr este objetivo se utilizarán distintos métodos analíticos. La elección de implementar análisis por medio de métodos analíticos se debe a que el corredor estudiado se trata de un tramo ferroviario de vía única, por lo que es confiable su evaluación por medio de esta técnica, sin representar la necesidad de procesos más complejos obteniendo de igual manera datos confiables en menor tiempo. (Márquez G. Vega L,2010). Esta prontitud en el análisis es idónea durante la etapa de evaluación anteproyecto donde se seleccionan los estudios factibles a llevarse a cabo.

La presente investigación busca dar solución a lo expuesto en la problemática, sobre falta de estudios y metodologías previas que aseguren la integración confiable de un tren de pasajeros. Además, que la evaluación de las propuestas (escenarios) que se obtengan con dicha metodología se tendrán que complementar con un análisis de costos, que sale de los límites de esta investigación, pero que debería de realizarse, con la intención de determinar su viabilidad económica, sobre todo porque muchas veces se mira a los sistemas de trenes ligeros desde el gobierno o inversionistas particulares como proyectos muy caros e irrealizables, buscando en muchas ocasiones hacer proyectos de menor costo, pero que también implican menor robustez y calidad, como es el caso del Metrobús, sin solucionar el problema verdaderamente, por lo que los costos aumentan exponencialmente a través del tiempo, además que en muchas ocasiones desde su inicios ya se encuentran saturados.

El alcance de este proyecto es estudiar la capacidad ferroviaria y buscar la solución inicial que pueda satisfacer la demanda por medio de los escenarios a nivel de anteproyecto. Esta metodología será la base de las distintas herramientas de análisis que se utilicen en futuras propuestas de proyectos ferroviarios en todo el país. Además, la solución obtenida servirá como punto de referencia y comparación en estudios sucesivos de la zona.

1.6 Uso del tram-tren en otros países y su adopción en México

El transporte urbano es un elemento estratégico para el desarrollo de una ciudad, ya que el movimiento de personas involucra también desplazamiento de recursos que se ve reflejado en crecimiento en la economía.

Para comprender el uso del tram- tren y su adopción en México y en el mundo, es indispensable primer definir al tram-tren con el enfoque más adecuado para este estudio, así como explicar al ferrocarril como transporte urbano. El transporte de tipo ferroviario se considera a todo aquel que se desarrolla por medio de rieles. Es de los modos de transporte más confiables debido a su baja accidentabilidad, alto volumen de transporte de pasajeros, afectación mínima a la operación debido al clima, además de ser un transporte ecológico gracias a su bajo número de emisiones a comparación con otros sistemas de transporte, y es un excelente ordenador territorial. (Bloch, 2012 como se citó en López,2018).

El ferrocarril cuenta con varios modos de transporte como son: metro, tren ligero, tranvía y sus respectivas variantes. (Vuchic ,2007 como se citó en López, 2018):

El ferrocarril metropolitano, tren pesado o mejor conocido en nuestro país como metro es un tipo de transporte ferroviario que genera un alto movimiento de pasajeros dando servicio a una densa población gracias a su velocidad y a su desarrollo mayormente subterráneo, convirtiéndolo en un transporte rápido y eficiente, con derecho de vía completamente exclusivo, su velocidad de operación alta permite una mayor distancia entre estaciones convirtiéndolo en un transporte cómodo, eficiente, confiable y seguro (Vuchic, 2007, como se citó en López, 2018). El metro es comúnmente integrado en grandes ciudades con alto número de habitantes y demanda, esto conlleva a que se encuentre en mega urbes como se ejemplifica en la Figura 2 con las imágenes del metro de la Ciudad de México, Nueva York, Tokio y Pekín, solo por mencionar algunas.

Figura 2

Metro en diferentes ciudades del mundo: Ciudad de México, Nueva York y Tokio



Fuente: Elaboración propia.

Otra variante de sistema ferroviario de pasajeros en las ciudades se da en el siglo XX con los tranvías ejemplificados en la Figura 3, los cuales presentan grandes ventajas, como permitir curvas muy cerradas para un fácil tránsito lo que permite circular en calles angostas sin ningún tipo de dificultad, tiene menores costos de construcción y gran acceso al centro de la ciudad ya que no necesitan carriles confinados además que no contaminan. (Vázquez, 2013). Por lo regular los tranvías constan de un vehículo, pero pueden ir enganchados hasta tres carros, con esto aumenta su capacidad además de que pueden operar en vías de tránsito mixto, su velocidad de operación depende de la vialidad en la que transita, pero por lo regular

es de velocidades bajas y permite estaciones muy cercanas entre ellas. (Vuchic, 2007 como citó López, 2018).

Figura 3

Tranvía en Oporto, Portugal



Fuente: Imagen propia.

El tren ligero o LRT por sus siglas en inglés (Light Rail Transit) es un sistema de transporte ferroviario de pasajeros que está guiado por medio de rueda de acero sobre carril de acero y tracción comúnmente eléctrica. Generalmente con plataforma reservada, el espacio de vía se encuentra separado del resto del tráfico por medio de vallas, cerca o alguna separación física que restringe el libre acceso, por lo regular cuenta con una segregación parcial o total de la vía y si fuera el caso de tener cruces a nivel cuenta con la preferencia de

paso, el material móvil se trata de un tren de peso “ligero”, ya que es menor al de un metro convencional además de ser de longitud limitada (menos carros que en metro) esta disminución de longitud en muchas ocasiones es debido a la necesidad de integración en las calles. (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2009). Son vehículos que operan generalmente de uno a cuatro vagones, la capacidad promedio es de 250 pasajeros y con una velocidad de operación de 18 a 40 km/h. (Vuchic, 2007, como se citó en López, 2018). Los trenes ligeros surgieron como una respuesta a la evolución de los tranvías, con el objetivo de mejorar las características de operación (López, 2018). En la Figura 4 se muestra al Tren Ligero que opera actualmente en la Ciudad de México, con una ruta de la estación Taxqueña- Xochimilco del cual se hablará más adelante.

Figura 4

Tren ligero de la Ciudad de México. Xochimilco-Taxqueña



Fuente: Servicio de Transportes Eléctricos, 2022. (<https://www.ste.cdmx.gob.mx/tren-ligero>) Dominio público.

Existe una variante del tren ligero llamado tram-tren. El tram-tren es un tipo de transporte ferroviario derivado del tren ligero que cuenta con la particularidad de poder circular en áreas urbanas e interurbanas sin necesidad de contar con una separación física de la vía con el resto de la infraestructura, por lo que cuenta con facilidad de adaptación a los medios locales y suburbano. Su circulación se adapta a vías nuevas o vías ya existentes y opera fácilmente con tráfico mixto. (Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2009)

Su principal función es satisfacer la demanda de movilidad en las zonas urbanas del centro de la ciudad y zonas más lejanas sin necesidad de transbordo, además que gracias a la adaptación de voltaje puede transitar en una infraestructura de ferrocarril o una de tranvía, lo que le permite regirse por normas ferroviarias y al ingresar al centro de la ciudad funcionar como tranvía sin ningún tipo de inconveniente, esta característica de adaptación al voltaje se dio en un inicio en Alemania, en donde en el centro de las ciudades se encontraban las líneas electrificadas, pero a las afueras operaba con diésel por falta de red eléctrica, por lo que la adaptación al voltaje se dio con el fin de cubrir la necesidad de transportar personas de las afueras al centro, aprovechando las vías de las afueras que se utilizaban exclusivamente para carga, por lo que al existir una necesidad de movilidad, se propuso la operación mixta como solución. (Roca, 2003)

El tram-tren al poder incorporarse tanto en vías de tranvía como de tren ligero, se adapta a las velocidades permitidas, según corresponda. Por ejemplo, en la ciudad circula a velocidades menores a 70 km/h mientras que en la red ferroviaria de la periferia puede alcanzar una velocidad máxima de hasta 100 km/h.

El nacimiento del concepto de tram-tren se dio en 1992 en la ciudad Karlsruhe, Alemania donde al notar el éxito y beneficios de este medio de transporte sobre otros, el sistema se expandió a diferentes regiones de Alemania y a otras partes del mundo como Países Bajos, Alicante España, Sarrebruck y Kassel. (Camacho, 2011).

La ciudad que vio nacer el concepto de tram-tren fue Karlsruhe en Alemania la cual contaba con vías de tren de uso exclusivo para trenes de carga, después de varios estudios donde se evidenciaba la necesidad de implementar un sistema de transporte masivo se observó que muchos de los puntos requeridos eran coincidentes con el trazo de tren actual, por lo que Karlsruhe, vio una puerta de oportunidad con el cual además de satisfacer la demanda de transporte que tenía esa ciudad se utilizarían las vías de tren ya existente dando un completo aprovechamiento a la infraestructura y reduciendo los costos de inversión inicial por construcción de vía nueva de manera considerable.

Con la introducción del tren ligero a la ciudad que utiliza la infraestructura de trenes convencionales, se inventó un nuevo concepto de transporte, que se denominó modelo Karlsruhe. El modelo Karlsruhe consiste en implementar un tram-tren en una vía que es compartida con diferentes tipos de trenes de carga, funcionando de manera coordinada y obteniendo un sistema seguro para todos los involucrados. (Camacho, 2011)

A pesar de que este sistema no es nada nuevo en Europa y Asia aun es un concepto poco explorado en América Latina pero del cual se pretende apostar por tratarse de un opción altamente eficiente, porque reduce de manera considerable los costos de inversión inicial de un tren de pasajeros, ya que utiliza una vía existente y genera una explotación a esa misma

línea férrea que es utilizada exclusivamente con bajo tránsito para carga, por lo que el tram-tren moviliza a pasajeros aprovechando las ventanas de tiempo que existe por el poco uso que tienen las vías, permitiendo trabajar a los dos sistemas simultáneamente de manera segura, se optimiza infraestructura.

El sistema tram-tren ha sido implementado en varias ciudades europeas y algunas más en América, uno de los ejemplos existentes en nuestro continente es el tren llamado “Trolley”, en la ciudad de San Diego, California, el cual es un sistema con 82 km de longitud que es operado con unidades múltiples eléctricas, actualmente con tres líneas que conecta al centro de San Diego con la ciudad de San Ysidro, frontera con México. (ARTF,2019).

Para comprender el análisis de capacidad de vía ferroviaria del Tren Ligero de Xalapa, es indispensable poner en contexto al lector, explicando que dicho proyecto pretende la implementación de un tipo de tren ligero denominado “tram-tren”, que implica tránsito lento y operando en la misma vía que el servicio de trenes de carga debido a que la red se encuentra subutilizada como fue el caso de Karlsruhe, por lo que en la presente tesis se utilizó dicha consideración para el desarrollo del estudio de capacidad ferroviaria. La justificación de sugerir este sistema de transporte se cita ampliamente en el estudio del Dr. David Camacho Alcocer del año 2011, en donde se promueve la posibilidad de integrar un tren de pasajeros en la vía ya existente con el fin de aprovechar las vías que atraviesan a la ciudad, coincidiendo con puntos de gran interés para la población, como es el campus de la Universidad Veracruzana (UV), centro de comercio como Plaza Cristal, zonas de alta densidad habitacional, áreas de esparcimiento como lo son parques, así como la central de autobuses de dicha ciudad con el objetivo de darle la mejor solución al problema de movilidad que

presenta Xalapa y su zona conurbada, además que el corredor actualmente es un área de inseguridad debido a que la zona ha sido utilizada para la delincuencia por la falta de luminarias y abandono, así como contaminación por falta de mantenimiento de infraestructura pluvial, invasión de vía, entre otros problemas de riesgo latente para la ciudad, por lo que la integración del tram-tren en Xalapa crea una oportunidad idónea de la implementación de un tren de pasajeros dando solución al problema urbano de seguridad, calidad de vida y de movilidad (Camacho, 2011).

En México existen diversos proyectos de tren de pasajeros, algunos ya prestando servicio y otros en etapas de construcción o planeación, pero únicamente el proyecto del Tren ligero de Xalapa considera la implementación de un tram-tren, por lo que sería el primero en su tipo en el país.

La decisión sobre implementar metro, tranvía o trenes ligeros se debe principalmente a la demanda de personas, conectividad, presupuesto e infraestructura con la que se cuente, por lo que en cada proyecto es indispensable el estudio particular para decidir la opción más adecuada de acuerdo con las circunstancias citadas, cada proyecto es único en su tipo por lo que siempre se debe realizar estudios que justifiquen o avalen tal elección.

I.6.1 Uso mixto de la red ferroviaria

El uso compartido o mixto de la vía se define como aquel donde se comparte el uso de la misma vía y corredor tanto para vehículos de carga como de pasajeros (Camacho, 2011).

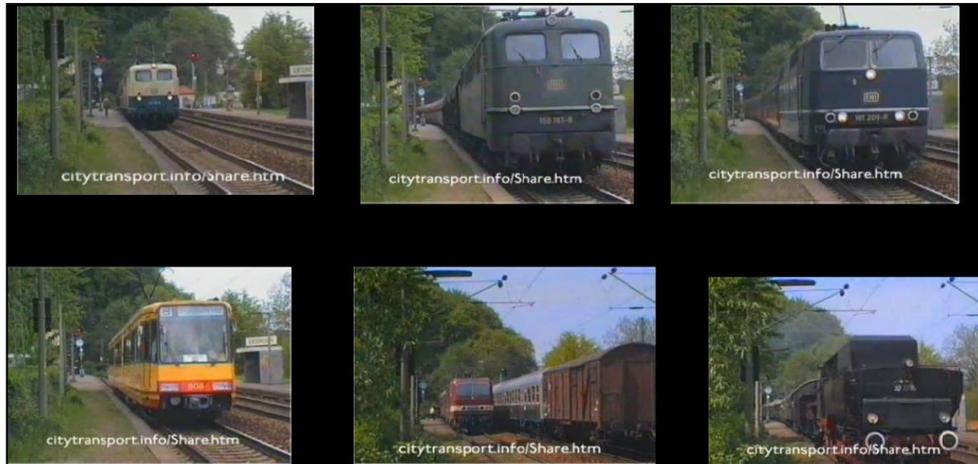
Existen dos métodos de operación de vía mixta aceptados:

- La primera es cuando la separación de los tipos de trenes; carga y pasajeros están divididos. Esto se da cuando toda la actividad de transporte de carga puede limitarse a un corto período de noche (ventana o intervalo de tiempo) sin afectar negativamente la operación de ninguno del sistema. Con este sistema se espera que en el día se pueda mover el transporte de pasajeros y en la noche el de carga.
- En el segundo se requieren operaciones concurrentes cuando la mayor parte de las actividades de los trenes de carga se pueden mover al horario nocturno, pero es necesario que un número de trenes se superpongan con el servicio de día de los trenes de pasajeros. Por lo que existirá una coordinación adecuada para que cuando ocurra la necesidad de transitar los dos tipos de trenes exista coordinación y prioridad y no se vea afectada la operación de ninguno de los sistemas involucrados.

Un claro ejemplo sobre la posible utilización de una sola vía para diferentes tipos de trenes se da en la ciudad de Ersingen en Alemania, en el cual sobre un mismo trazo ferroviario transitan seis diferentes tipos de trenes en un mismo día. En la Figura 5 se puede observar la multifuncionalidad y eficiente utilización de un mismo trazo férreo. Este caso demuestra como la operación simultanea es una realidad que existe y para exitosamente ya en otras partes del mundo. (Camacho, 2011)

Figura 5

Ejemplos de interoperabilidad de un sistema ferroviario



Fuente: Camacho, 2011

La integración del tren de pasajeros en México es una realidad que se puede conceptualizar, debido a que en las concesiones se especifica claramente que el único dueño de la red es el Estado y que los concesionarios únicamente tienen el permiso de operar las vías, bajo ciertas restricciones y puntos que deben respetar, pero se debe permitir la operación de trenes de pasajeros, esto de acuerdo con la reforma publicada el 2 de marzo de 1995 que sé público en el Diario Oficial de la Federación, en el cual permite el Estado a particulares prestar servicio ferroviario. De acuerdo con el capítulo II en el apartado 2.3 Servicio de transporte ferroviario de pasajeros donde se cita textualmente: “El Concesionario deberá otorgar las facilidades necesarias para que, en su caso, el servicio de pasajeros urbano y suburbano se preste adecuadamente, con apego a los itinerarios que se acuerden”. (Secretaría de Gobernación, 1997). Por lo que el paso a seguir para integrar estos sistemas de transporte en el país es el estudio de viabilidad técnica que es la que será evaluada con esta

investigación, demostrando que la integración de ambos sistemas se puede realizar sin causar ningún problema a la operación de ambos con la seguridad y calidad de servicio pertinente, bajo ciertos supuestos y escenarios.

Para que una propuesta de uso de vía mixta beneficie a las distintas partes involucradas, esta debe de:

Beneficiar tanto las operaciones de carga y pasajeros por medio de inversión y construcción de la infraestructura mínima necesaria para la optimización de la infraestructura ferroviaria, con acciones y mejoras al mantenimiento, señalización, sistemas de control, entre otros (Camacho, 2011).

La introducción de un tram-tren con vía compartida representa una opción realmente beneficiosa, puesto que, si este se encuentra posicionado estratégicamente en zonas de atracción de viajes, este sistema es capaz de generar multimodalidad, ya que no solo el corredor ferroviario mejora, si no la infraestructura vial cercana a él y la correspondiente a otros medios de transporte. Por ejemplo, se crean zonas seguras de ascenso y descenso en el transporte público (taxis, autobuses, bicicletas públicas) lo que crea un transporte integral que mejora la economía de los prestadores de servicios y usuarios, así como la reducción del impacto ambiental debido a la utilización de una vía ya construida. Esto además se traduce en la reducción en costos por construcción, lo que vuelve al tram-tren una inversión intermedia entre el tren ligero y un tren de cercanías (Camacho, 2011).

Es importante llegar a buenos acuerdo con los concesionarios, los cuales deben incluir a todas las partes involucradas (Estado y concesionarios), ya que el uso de vía mixta requiere

de inversión para otorgar seguridad elevada por medio de tecnología, señalización, trenes con tecnología, telecomunicaciones con el propósito evitar errores humanos y accidentes. Por lo que además de la señalización tradicional es necesario la implementación de sistemas de frenado automático por si se presentara algún tipo de anomalías, pensando en la seguridad de los usuarios (ARTF, 2019).

Los sistemas de tram-tren en el mundo están creciendo, por lo que incorporarlos en México resultaría beneficioso, ya que es un país con alta demanda en transporte masivo causada por su elevada densidad poblacional por lo que requiere de soluciones efectivas que prevalezcan en el tiempo, transportes de calidad.

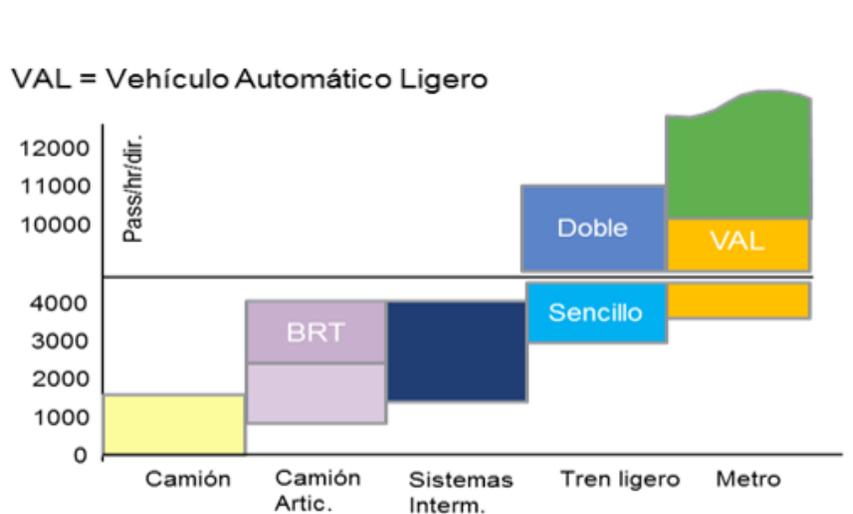
Como menciona el Dr. David Camacho (2011) en su investigación, algunos de los beneficios que otorga un tren ligero son:

- Transporte eficiente y sustentable, por su bajo consumo energético en contraparte con el alto número de pasajeros que es capaz de mover en un solo tren
- Moviliza a un alto número de pasajeros, al ser un transporte masivo y con posibilidad de expansión, además de ser flexible, seguro y cómodo
- Detonador de la economía e inversión urbana
- Implementación rápida del sistema de transporte, con la cooperación de las partes involucradas
- Mejora el ambiente urbano y la seguridad
- Ayuda a crear una unificación urbana a través de corredores de servicios con infraestructura peatonal ciclista o parques lineales

En la Figura 6 se puede apreciar una gráfica del número de pasajeros que se pueden transportar/hora cada tipo de transporte. El metro es el vehículo que mueve el mayor número de pasajeros solo por detrás se encuentra el tren ligero, el cual requiere menor inversión que el metro, al poder transitar en vía compartida. En países como México los últimos años el Gobierno han apostado por invertir en BRT (mejor conocido en México como Metrobús), el cual mueve la mitad de los pasajeros, requiere de mayor unidades para transportar el mismo número de usuarios, tiene elevados costos de operación y cambio de unidades constantemente debido al desgaste. Por su parte un tren ligero o tram-tren tiene la capacidad de transportar tres veces más personas, menos emisiones contaminantes, aprovechamiento de la infraestructura existente y el cambio de las unidades por desgaste es a largo plazo, volviéndolo una excelente alternativa costo-beneficio.

Figura 6

Gráfico de comparación de transporte de pasajeros por hora en diferentes sistemas de transporte.



Fuente: Thales Transportation Solution Control and Command for a LRT Network

I.6.2 Trenes de pasajeros que actualmente funcionan en México

Como se muestra en el capítulo anterior, existen diferentes proyectos de trenes de pasajeros en México, algunos ya prestando servicios y otros que se encuentran en fase de construcción o inclusive planeación, por lo que con este capítulo se abordará la importancia que tienen este tipo de proyectos para la movilización de pasajeros en nuestro país y el por qué se debe seguir fomentando este tipo de proyectos en mejora de la movilidad.

En esta sección se presentan cifras sobre el comportamiento del transporte de pasajeros que existen por medio de ferrocarril en México. Actualmente hay cinco concesionarios de servicio de pasajeros:

1. Tren Suburbano de la Zona Metropolitana del Valle de México (Concesión a Ferrocarriles Suburbanos S.A. de C.V.)
2. Tren turístico Puebla-Cholula (Asignación al Edo. De Puebla)
3. Ferrocarril Chihuahua-Pacífico conocido popularmente como: “El Chepe” (Concesión a Ferrocarril Mexicano S.A. de C.V.)
4. Tren Tequila Express (Asignación al Edo de Jalisco y del cual Ferromex le provee arrastre)
5. Tren de la vía corta Tijuana-Tecate (Asignación al gobierno de Baja California)

En la Tabla 1 se muestran los diferentes modos de transporte ferroviario de pasajeros que existen en México, así como quien es el concesionario o asignatario que presta el servicio,

en la tercera columna aparece que modalidad cuenta cada tren como es: regular suburbano o turístico, en donde observamos que de los cinco servicios de pasajeros que actualmente prestan servicio en nuestro país es de tipo regular urbano, los cuatro restantes van enfocados al ambiente turístico.

Tabla 1

Modalidades del transporte de pasajeros en el Sistema Ferroviario Mexicano

Modo de transporte	Concesionario/Asignatario	Modalidad
Tren Suburbano de la Zona Metropolitana del Valle de México	Ferrocarriles Suburbanos S. A. de C. V.	Regular Suburbano
Tren Turístico Puebla-Cholula	Estado de Puebla	Especial Turístico
Ferrocarril Chihuahua-Pacífico	Ferrocarril Mexicano, S. A. de C. V.	Regular Interurbano / Especial Turístico
Tren Tequila Express	Estado de Jalisco	Especial Turístico
Tren de la Vía Corta Tijuana-Tecate	Estado de Baja California	Especial Turístico

Los datos que se presentan fueron obtenidos del Anuario Estadístico Ferroviario del 2019 creado por la ARTF, en el cual se publicaron datos del periodo comprendido entre 1994-2019, esto con la intención de crear una comparativa del impacto que ha tenido la movilidad de tren de pasajeros durante los últimos años en México

La mayoría de los trenes de pasajeros que funcionan en nuestro país hoy en día son considerados de carácter turístico, por lo que cuenta con un porcentaje bajo de movilidad de pasajeros a comparación de otros medios de transporte, como el autotransporte y el avión, por lo que el único tren que presta servicio como transporte masivo en modalidad regular, es el tren suburbano, moviendo el 99.3% de los pasajeros que utilizan al ferrocarril como medio habitual de transporte.(ARTF, 2019) Lo que lleva a reflexionar, que México requiere de más proyectos que persigan el objetivo de ofrecer un sistema de transporte ferroviario de pasajeros que satisfaga necesidades de movilidad causadas por actividades elementales y cotidianas en lugar de solamente turísticas.

En la Tabla 2 (Anuario Estadístico Ferroviario, 2020) se presenta el número total de pasajeros que se movieron en ferrocarril en el año 2019, en donde los meses de con menor número de usuarios fueron abril y junio que correspondiente a periodo vacacional en las escuelas, destacando que el mayor movimiento de pasajeros en México se lleva a cabo para actividades cotidianas y no turísticas, a pesar de que de los cinco servicios de pasajeros cuatro son destinados para esta actividad.

Tabla 2*Volumen mensual de pasajeros transportados por ferrocarril en el 2019*

Mes	Pasajeros	Pasajeros-kilómetros (millones)
Enero	4,824,909	129.8
Febrero	4,598,379	130.9
Marzo	4,934,768	138.4
Abril	4,505,606	118.2
Mayo	4,857,522	130.7
Junio	4,519,869	119.2
Julio	4,570,558	115.6
Agosto	5,104,313	143.2
Septiembre	4,778,335	132.9
Octubre	5,308,219	152.9
Noviembre	4,945,693	140.6
Diciembre	4,563,133	118.2
TOTAL	57,511,304	1,570.6

El tren suburbano logró transportar en el 2019 a 57.5 millones de personas, cada año ha presentado una tasa de crecimiento, excepto en el año 2018 donde tuvo un descenso de 0.49%. (Anuario Estadístico Ferroviario, 2020)

Tabla 3*Volumen anual de pasajeros transportados por ferrocarril, periodo 2008-2019*

Mes	Pasajeros	Pasajeros (millones de pasajeros-km)
2008	8,915,460	178
2009	28,000,126	450
2010	40,398,835	843
2011	41,922,232	891
2012	43,830,219	970
2013	45,287,695	1036
2014	47,887,918	1,150
2015	53,593,541	1,411
2016	55,765,824	1,481
2017	56,714,825	1,550
2018	57,757,071	1,591
2019	57,511,304	1,571

- Tren Suburbano

El tren suburbano que se muestra en la Figura 7, es el único de los trenes de pasajeros en México que presta servicio de modalidad regular, por lo que mueve diariamente a personas del Estado de México hacia la Ciudad de México por actividades indispensables como trabajo, escuela, compras, entre otras. Mueve mensualmente un promedio de 4.8 millones de

pasajeros, además que de acuerdo al Anuario Estadístico publicado por la ARTF en el 2019 fue el tren que dió servicio al 99% de los usuarios de tren en nuestro país.

El Tren Suburbano fue la primera concesión otorgada de pasajeros, por lo que desde el 2008 ha prestado servicio. (ARTF, 2019) Transporta a miles de personas diariamente desde la estación Buenavista a Cuatitlán en un recorrido de 27 kilómetros en un promedio de 25 minutos, comparativo que el mismo recorrido por autotransporte se da en un tiempo de hasta 1 hora con 30 min (Ferrocaril Suburbanos, 2008). El proyecto aun cuenta con una segunda etapa en planeación en la que se pretende extender el tren hacia Huehuetoca y Xaltocán, teniendo un total de 50 kilómetros y beneficiando a más de 15 millones de habitantes. (FSuburbano, 2008).

Actualmente da servicio a Tlalnepantla, Tutitlán, Cuatitlán, Cuatitlán Izcalli en el Estado de México, mientras que en la Ciudad de México recorre las delegaciones de Cuauhtémoc y Azcapotzalco. El tren suburbano es operado por la empresa española Construcciones y Auxilia de Ferrocarriles (CAF), la cual ganó la licitación en el 2003 dada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), dicha concesión fue otorgada por un periodo de 30 años.

Las tarifas del Tren Suburbano son calculadas según la distancia que recorra el usuario, las tarifas que se muestran en su página oficial actualizadas al 30 de enero del 2022 pueden ir desde los \$9.50 en viajes cortos de hasta 12.89km y de \$21.50 en viajes largos, que van desde los 12.90 km hasta 26.59 km. (Ferrocariles Suburbanos, 2022) La tarifa se clasifica por

los kilómetros recorridos denominado de corta y larga distancia respectivamente, además de ser registradas y aprobadas previamente por la ARTF.

El tren suburbano adapta su capacidad de movimiento de pasajeros en horarios de máxima demanda aumentando el tren a 8 vagones, mientras que en los demás horarios opera con 4 vagones, lo que significa que aumenta el movimiento de pasajeros en un 50%. (FSuburbanos, 2008).

Figura 7

Sistema de transporte del Tren Suburbano de la Ciudad de México



Fuente: FSuburbano, 2008. (<http://fsuburbanos.com/>). Dominio Público.

El suburbano a pesar de representar el 99% de movilidad de pasajeros que se mueven por tren y mover en promedio 160 mil pasajeros diariamente, estaba proyectado para movilizar hasta 320 mil usuarios, esto hace que el Gobierno siga teniendo que cubrir un subsidio por que el número de pasajeros no logró lo proyectado. (ARTF, 2019) Lo que representa un

sobredimensionamiento de la demanda proyectada inicial misma que no se ha alcanzado hoy en día. Otros problemas que conllevaron a no alcanzar la demanda proyectada son:

- Escasez de rutas alimentadoras, ya que existe desconexión entre las estaciones y las zonas habitacionales, lo que representa dificultar el acceso ya que los usuarios deben buscar además otro sistema de transporte que los conecte entre el tren y sus hogares y viceversa.
- Inseguridad en la zona, el área cercana a las estaciones se cuentan poco vigiladas y desatendidas, haciendo que los usuarios apuesten por otros medios de transporte.
- Costo del pasaje, los usuarios consideran que el costo del viaje es alto y que la relación costo-tiempo no es congruente, por lo que recurren a transportes más económicos.

Para que el Sistema de Tren Suburbano alcance el éxito deseado primero es necesario (ARTF, 2019):

- Generar una coordinación adecuada con las rutas alimentadoras. En este caso, coordinar las combis que conectan al Estado de México mediante acuerdos que beneficien a todos los involucrados, para que los usuarios logren conectarse de manera eficiente y segura a las estaciones
- Brindar seguridad en las distintas zonas de acceso mediante vigilancia y con apoyo del Estado y los ciudadanos

- Generar políticas para adaptar la tarifa, logrando que las personas que viajan más lejos tengan subsidios debido a su bajo poder adquisitivo
- El Tren Suburbano representa un gran éxito como tren de pasajeros, si bien aun cuenta con deficiencias, es un proyecto que evidencia y da pautas para muchas políticas públicas necesarias en México

En cuanto a los trenes tipo turísticos se considera las 4 concesiones restantes:

- Tren Turístico Puebla-Cholula

El Tren Turístico Puebla-Cholula fue construido con el objetivo de conectar el centro de la Ciudad de Puebla con el centro de Cholula. El tren conecta a cuatro municipios conurbados: Puebla, Cuautlancingo, San Pedro Cholula y San Andrés Cholula. El trazo ferroviario tiene una longitud de 17.2 km de vía. Inició operaciones en el año 2017, durante el sexenio del presidente Enrique Peña Nieto. (Ver Figura 8)

El tren cuenta con dos terminales y dos estaciones intermedias las cuales se encuentran interconectadas con otros modos de transportes, para generar una operación ordenada y eficiente del transporte público, además de que las estaciones intermedias se ubican en polos estratégicos atrayentes de turismo nacional e internacional, como lo son: museo, catedrales, bibliotecas, entre otros. (Gobierno de Puebla, 2017). Lamentablemente debido a la falta de planeación previa y debido a que a la baja demanda que existe es posible que deje de operar en los próximos años.

Figura 8

Tren turístico Cholula-Puebla



Fuente: Gobierno de Puebla, 2017. (<https://www.ferromex.com.mx/>). Dominio público.

- Ferrocarril Chihuahua-Pacífico

El tren Chihuahua-Pacífico (Ver Figura 9) mejor conocido como “Chepe”, viaja a través de la sierra Tarahumara. Es el tren con mayor longitud de vía, aproximadamente 350 km, que son recorridos en nueve horas aproximadamente, inicia su recorrido en la ciudad de los Mochis, Sinaloa, y termina en Las Barrancas del Cobre en Chihuahua. Este recorrido turístico transita por paisajes de montaña además de que también con el boleto se adquiere un servicio de comida estilo regional. Fue inaugurado en 1998 por la empresa concesionaria Ferromex y transporta aproximadamente 80 mil personas por año. (Ferromex, 2020)

Las tarifas en el “Chepe” están divididas en dos, uno es para transportar a los habitantes de la zona, por medio de la clasificación: clase económica y el que tiene objetivo de fines turísticos “Primera Express”. A pesar de esta distinción de tarifas, el objetivo del tren se

enfoca al área turística, por lo que es un contraste en movimiento de pasajeros al tren Suburbano (Ferromex, 2020).

Figura 9

Tren turístico Chihuahua- Pacífico



Fuente: Ferromex,2020. (<https://www.ferromex.com.mx/>).Dominio público.

- Tren Tequila Express

El tren Tequila Express fue fundado por el concesionario Ferromex junto con la Cámara Nacional de Comercio de Guadalajara en el 1997. El servicio conecta a la ciudad de Guadalajara, Jalisco, con la destilería de Tequila Sauza, una de las encargadas de producir el Tequila José Cuervo. El recorrido en el tren es únicamente turístico, por lo que las instalaciones son lujosas y buscan el entretenimiento de los pasajeros, tal como se observa en la Figura 10. (Ferromex, 2020).

Figura 10

Tren turístico Tequila-Express



Fuente: Price Travel, 2020. (www.picetravel.com.mx). Dominio público.

- Tren de la Vía Corta Tijuana-Tecate

El tren de la Vía Corta Tijuana-Tecate es el tren turístico que conecta a la ciudad de Tijuana con el pueblo mágico de Tecate. El tren se encuentra a cargo del gobierno del estado de Baja California, realizando un recorrido de dos horas y media con una capacidad de 280 personas por viaje. Se realiza un recorrido con diferentes paradas para apreciar los paisajes de la región además de una degustación de platillos típicos de la región durante el viaje (Ver Figura 11).

Figura 11

Tren turístico Tijuana-Tecate



Fuente: Administradora de la vía corta Tijuana-Tecate, 2015. (fcbc.com.mx). Dominio público.

El porcentaje de pasajeros que mueve anualmente cada modo de transporte: aéreo, marítimo, carretero y ferroviario es publicado en el Anuario Estadístico Ferroviario de la ARTF. En el anuario publicado en el 2020 presenta que el ferrocarril es el modo que más ha creció en los últimos años, con un incremento de casi 700% contemplando de 1994 hasta la fecha. A pesar de su crecimiento, el movimiento de pasajeros por ferrocarril sigue siendo mínimo considerando que los servicios de trenes de pasajeros son mayoritariamente de tipo turístico, lo que representa movimiento bajo a comparación de ferrocarriles de pasajeros de uso para actividades cotidianas.

Existe un reducido movimiento de personas por medio del ferrocarril debido a que existe poca oferta de trenes de pasajeros, a pesar de que, la necesidad de movilidad existe, esto se observa por ejemplo con el alto número de personas que se transporta diariamente en el Tren Suburbano, Metro de la CDMX, Metro de Monterrey y Metro de Guadalajara, pero no hay

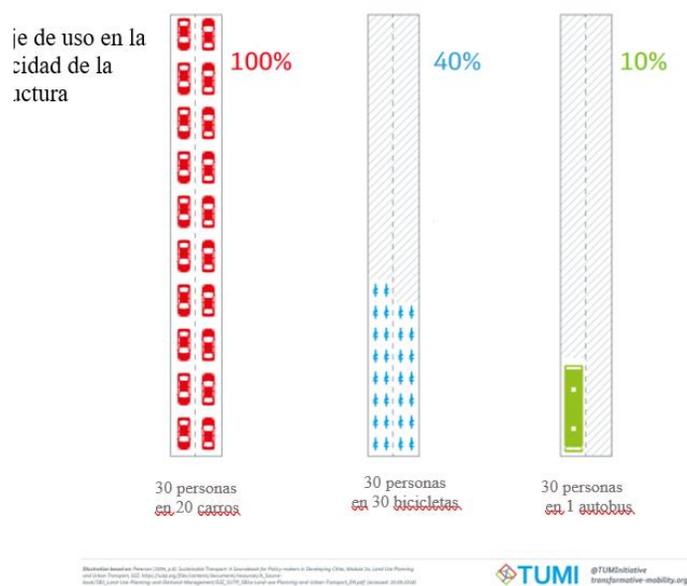
suficiente oferta de trenes de pasajeros en el resto de nuestro país, a pesar de que los medios de transporte actuales se encuentran en su mayoría colapsados, son poco eficientes y nuestras ciudades están altamente contaminadas por el excesivo uso de automóvil, no se ha dado la prioridad a proveer a la población de transportes masivos eficientes, limpios, por lo que el impulsar los sistemas de tren ligero en las ciudades representan una gran alternativa de solución al transporte.

La infraestructura existente en México y en el mundo debe optimizarse, los Gobiernos deben de invertir en las opciones e infraestructura con lo que se cuenta. Un claro ejemplo de optimizar la infraestructura se presenta en la Figura 12 en la cual se muestra como un mismo número de personas pueden ocupar el mismo espacio de manera diferente de acuerdo con el sistema de transporte que se utilice. Por ejemplo, en la primera parte de la imagen se muestra a 30 personas transportándose en 20 autos ocupando el 100% de la infraestructura, colapsando en su totalidad la vía y generando tiempos de viajes muy largos y viviendo tráfico diariamente que se traduce a menor calidad de vida para los habitantes, ya que se invierte más tiempo en el transporte que en sus mismas actividades. En la imagen intermedia se muestra a las mismas 30 personas, pero ahora transportadas en bicicleta, ocupando únicamente el 40% de la infraestructura además de ser un transporte completamente limpio, que emite 0% de emisiones, tiempos de viajes menores y la infraestructura aún tiene capacidad para mover más personas. Por último se muestra cuando las 30 personas se mueven en un BRT o Metrobús ocupando únicamente el 10% de la infraestructura en una sola unidad para moverse, además de ser emisiones más bajas que las de los vehículos, si bien es cierto que el transporte masivo si tiene emisiones, el porcentaje es muy bajo de acuerdo a al número de personas que transporta, además que en muchas ciudades de México es poco realista

considerar que las personas se transportarán únicamente en bicicleta debido a que son ciudades muy grandes y la bicicleta es el transporte de la última milla, por lo que la solución de movilidad sensata es el transporte público masivo. (DB E.C.O. North America Inc, 2022 citó de Petersen 2004).

Figura 12

Capacidad de la infraestructura de acuerdo con el modo de transporte



Fuente: DB E.C.O. North America Inc, 2022 citó de Petersen 2004.

Este ejemplo solo es una muestra de que el uso excesivo y prioritario al automóvil es un problema a la movilidad actual, y que las políticas públicas deben cambiarse a ofrecer sistemas de transporte masivos seguros y eficientes para todos, para reducir el uso excesivo del auto transporte que ha generado múltiples problemas a nuestras ciudades como vías colapsadas, tiempos de recorrido altos y gran contaminación, solo por mencionar algunas.

Al observar los resultados obtenidos tras la implementación del tren suburbano: única concesión para transporte masivo de ferrocarril de uso diario se muestra claramente como se aumentó el movimiento de personas por medio de tren, ya que la necesidad de movilidad ya existía en la zona. Con esto no solo se introdujo un medio de transporte sino además se mejoró la calidad de vida de los usuarios al disminuir los tiempos de viajes y al aumentar la productividad entre los usuarios.

Es necesita implementar un mayor número de proyectos de este tipo que den mejora a las condiciones sociales de todos los usuarios. Hace falta invertir en más trenes de pasajeros en donde realmente se interese en satisfacer las demandas a las actividades cotidianas de los usuarios y no únicamente actividades turísticas, ya que el desplazarse de un punto a otro es una necesidad primordial en la sociedad y eso solo se logra con transportes bien pensados y estructurados.

I.6.3 Trenes de pasajeros en desarrollo en México

Tren Maya:

El proyecto de “Tren Maya” fue propuesto en el sexenio que dio inicio en el 2018 con el Gobierno del presidente de México Andrés Manuel López Obrador.

El proyecto del Tren Maya está a cargo del Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR) el cual tiene documentado las características, objetivos y avance actual de dicho proyecto. Este tren tiene como objetivo el proporcionar el servicio de transporte por medio del ferrocarril en las principales ciudades de la Península de Yucatán, (Figura 13) el cual busca impulsar el desarrollo socioeconómico de la región y comunidades locales, así

mismo crecer la industria turística en México, además de disminuir la marginación, fomentando la inclusión social y creación de empleos en toda la zona. (FONATUR, 2019).

Figura 13

Localización Geográfica del Tren Maya

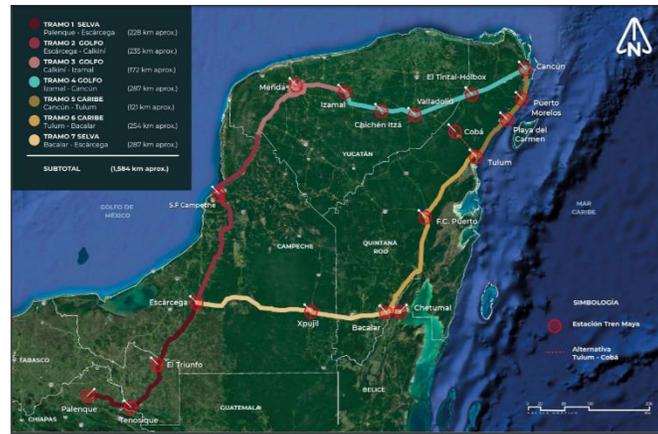


Fuente: FONATUR, 2020. (www.trenmaya.gob.mx). Dominio público.

De acuerdo con FONATUR, el proyecto recorrerá una distancia de 1,500 km pasando por los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo tal como se observa en la Figura 14. Con esto se busca conectar los principales centros turísticos de la zona, generando riqueza a la población, disminución de la pobreza, erradicación de la marginación además de beneficiar socialmente a las comunidades, otorgando facilidad de movilidad a la zona.

Figura 14

Etapas del proyecto del Tren Maya



Fuente: FONATUR, 2020. (www.trenmaya.gob.mx). Dominio público.

Los trenes de pasajeros antes mencionados son muestra de la oferta de pasajeros que se encuentra actualmente en México y ninguno de ellos son catalogados como proyectos exitosos, ya que desde su planeación se omitió parcial o totalmente el diseño técnico, ya que se encuentran sobredimensionados, la demanda proyectada para cada uno de ellos es menor de lo que se preveía, es por ello que con esta investigación se pretende realizar la valoración técnica del Tren Ligero de Xalapa y dar las condiciones mínimas que debe tener la red para evitar gastos excesivos que se traducen a fracaso, este estudio busca promover la implementación de tram-tren en diferentes zonas del país como transporte masivo.

1.7 Contexto de la Región de Xalapa, Veracruz

Xalapa es la capital del estado de Veracruz llamada coloquialmente como Atenas Veracruzana, debido a la calidad de instituciones académicas con las que cuenta, muchas

veces galardonadas, como lo son la Universidad Veracruzana y la Escuela Normal Veracruzana ambas con un alto nivel académico.

Xalapa cuenta con una población total de 424 755 habitantes según el censo de población y vivienda realizado por el INEGI en el 2010, colocando a la ciudad como la segunda más poblada del estado, solo por detrás del puerto de Veracruz, con un 5.99% de población total de la entidad. La actividad económica principal de Xalapa es la burocracia, ya que en la entidad se encuentran los tres poderes del gobierno estatal, así como la rectoría de la Universidad Veracruzana, una de las universidades más prestigiosas del país; el resto de la población trabaja en el sector privado y de prestación de servicios.

La región de Xalapa es boscosa y permanente verde, el clima tiene un promedio de 18°C anuales, resultando contrastante con el resto del estado, sobre todo con la ciudad de Veracruz. (INEGI, 2010)

Xalapa se ha caracterizado por contar con una población letrada y de un alto número de comunidad universitaria, por lo que mucho del ingreso depende de los universitarios que se mudan a la ciudad provenientes de otras partes del estado o del país, para realizar sus estudios profesionales.

Xalapa se encuentra ubicada a 355 km de la Ciudad de México, tal como se muestra en Figura 15, tiene una superficie total de 142.88 km², representa el 0.17% de la extensión del territorio veracruzano, su altitud esta sobre los 1420 metros sobre el nivel del mar. (INEGI,2010).

Figura 15

Localización Geográfica del Estado de Veracruz



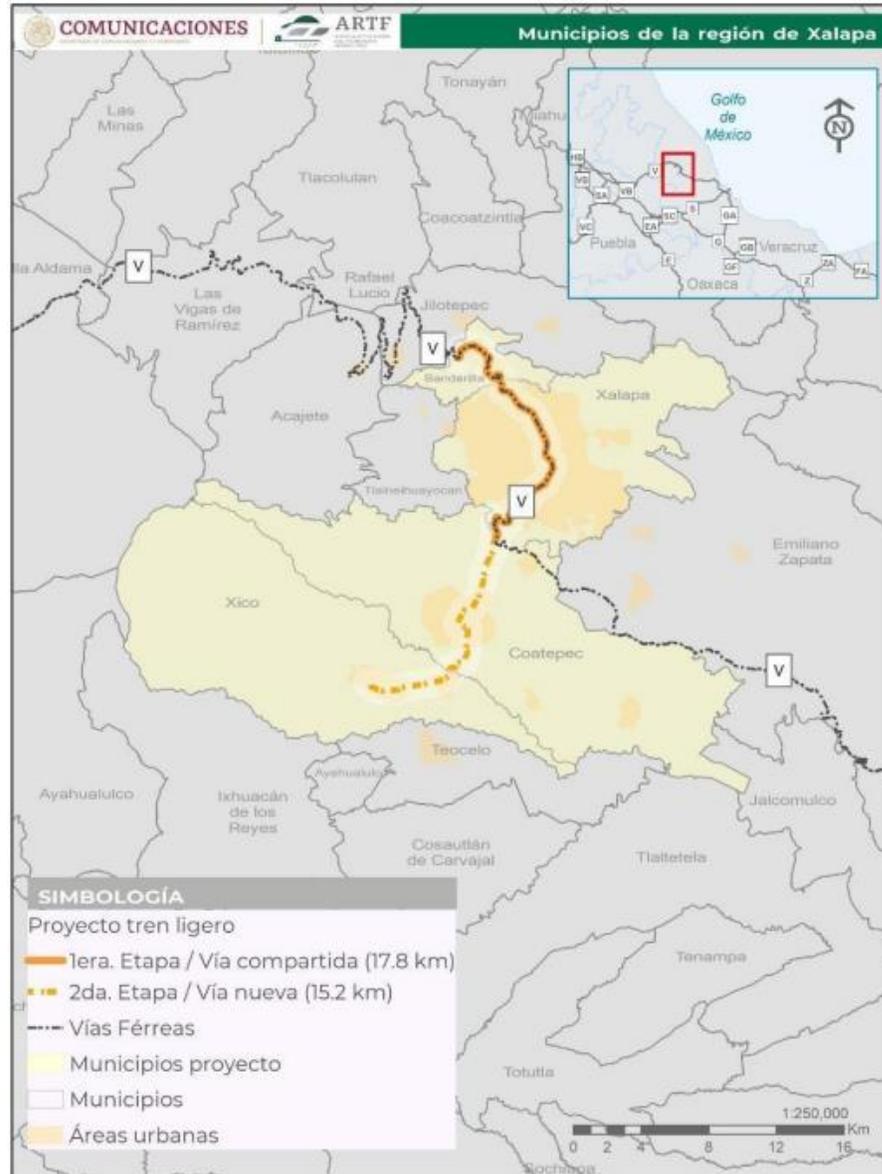
Fuente: Camacho, 2011.

La zona metropolitana de Xalapa se integra por los municipios de Banderilla, Coatepec, Emiliano Zapata, Jilotepec, Rafael Lucio y Tlalnahuayocan. Con 666,535 habitantes. (INEGI, 2010).

En Xalapa la mancha urbana se ha concentrado alrededor del trazo ferroviario tal y como se observa en la figura 16, las vías cruzan la ciudad de norte a sur, dividiendo a la ciudad prácticamente en dos y en muchas ocasiones limitando el acceso de un lado a otro, creando una barrera que favorece a la segregación y desigualdad. La integración de un tren de pasajeros en la ciudad significaría libre acceso, comunicación y movilidad a un gran porcentaje de personas creando un corredor de movilidad y mitigando la inaccesibilidad.

Figura 16

Mancha urbana de Xalapa, línea férrea y etapas del proyecto



Fuente: ARTF, 2019

En los últimos años el crecimiento de población ha sido considerable, tan solo de 1990 a 2002 la población en Xalapa creció un 35%, con prioridad de expansión hacia la zona sur, en

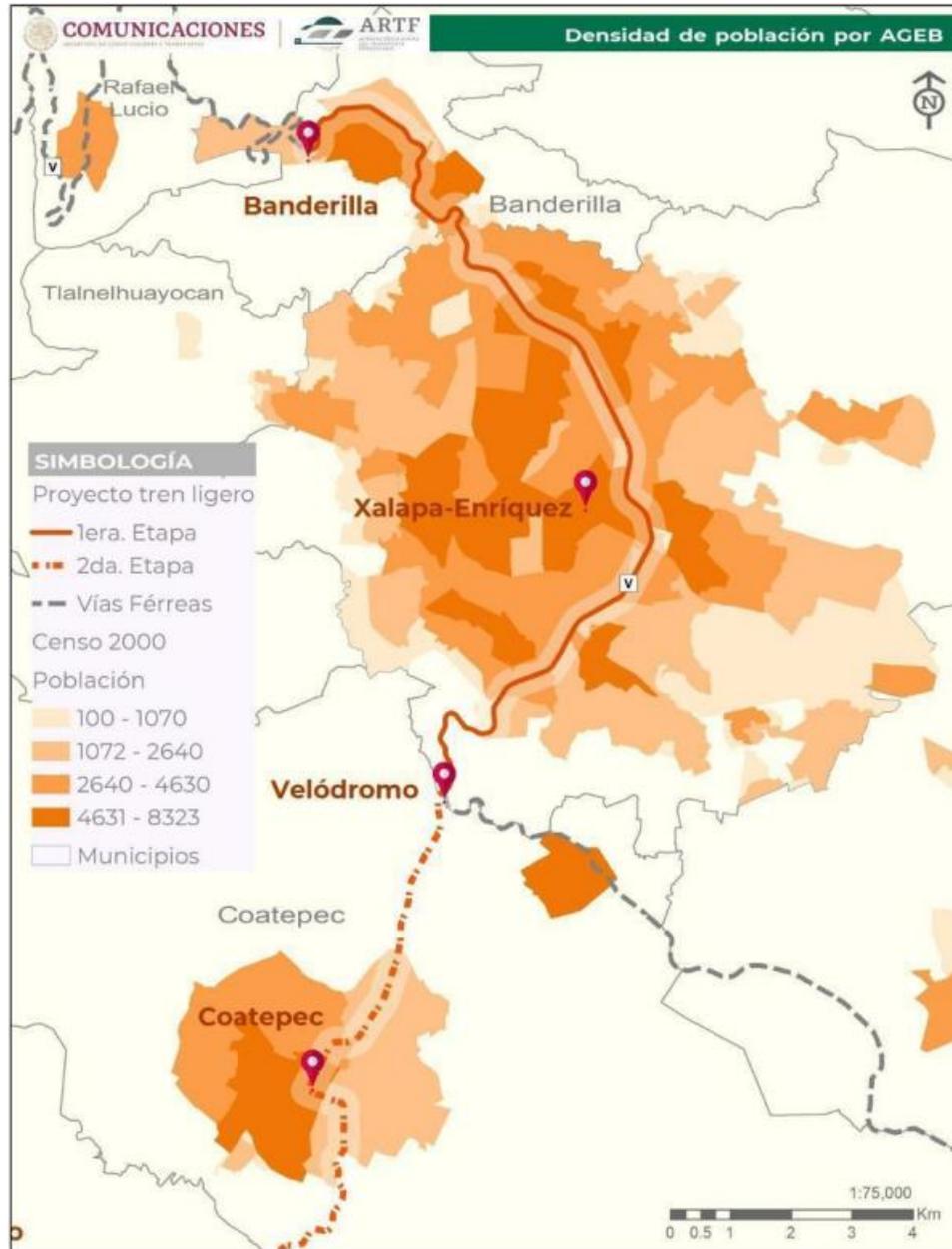
el área de Emiliano Zapata disminuyendo significativamente las áreas verdes en la región generando un gran impacto negativo al ambiente. (ARTF, 2019)

La implementación de un tren ligero en la zona beneficia a que la población se concentre mayormente alrededor de la zona de acceso al tren, deteniendo el crecimiento horizontal y promoviendo que las ciudades crezcan hacia arriba, deteniendo la expansión más allá de la “mancha urbana” (redensificación urbana) ya que al expandirse dificulta a las autoridades proveer de manera general a la población de todos los servicios básicos, aumentando la pobreza, precariedad e inseguridad aparte de detener la expansión que promueve la eliminación de áreas verdes. La concentración beneficia a todos ya que aumenta la calidad de vida, ciudades más pequeñas generan mayor orden e igualdad. (ARTF, 2019).

Como se muestra en la Figura 17 actualmente la población en Xalapa se encuentra intensificada en el centro de la ciudad y en zonas cercanas al tren, mostrando que el proyecto beneficiaría directamente a la mayor cantidad de habitantes de la zona, por lo que debe ser aprovechada esta gran ventaja de que la mayor población ya se encuentra ahí, solo hay que darle una mejor opción de transporte en el cual moverse.

Figura 17

Densidad de la ciudad de Xalapa



Fuente: ARTF, 2019.

En Xalapa el 40.5% de la población se encuentra debajo de la línea de pobreza, lo que genera números alarmantes de necesidad de nuevas políticas para disminuir la pobreza y marginación. Además, el nivel de desigualdad de la región es un punto que requiere ser atendido de manera urgente y una de las maneras es dando acceso a la movilidad por medio de un transporte público masivo eficiente y accesible para todos que permita a los habitantes moverse a su trabajo, escuela y actividades de ocio de manera digna y a bajo costo.

Muchas zonas con el mayor índice de marginación coinciden con el trazo del tren, implicando que este sector tendría un mayor acceso al transporte que se refleja en reducción de la pobreza, ya que, al darle acceso a la población de un transporte masivo, eficiente, las personas tendrán acceso también a una mejor calidad de vida, educación, mejores trabajos, invertirían menos dinero y tiempo para transportarse y más en otras actividades. (ARTF, 2019). De acuerdo con el Índice de Movilidad Urbana (UMC) y el Instituto Mexicano Para la Competitividad (IMCO) en México en un hogar promedio gasta 1,315 pesos mexicanos al mes solo en transporte, lo que equivale a un 19% del ingreso en los hogares, considerando que el salario promedio de los mexicanos es 7 mil mensual, pero esto solo es un primer acercamiento a la realidad, ya que mientras el hogar se encuentre más alejado del centro de las ciudades este gasto aumenta hasta 1,568 pesos, lo que equivale a un 22.4% del salario, convirtiendo a México en uno de los países en los que su población gasta más en transporte. (Vela, 2019). Fátima Masse vocera del IMCO el pasado 29 de enero del 2019 durante su conferencia en el IMU hizo una llamada los gobiernos a invertir en proyectos urbanos que incluyan al peatón, ya que como aclaró el crecimiento económico e igualdad social no se logrará en ciudades con más autos, se logrará con transportes masivos de calidad, ya que los autos promueven la dispersión territorial y aumento de la marcha urbana (Vela, 2019). Por

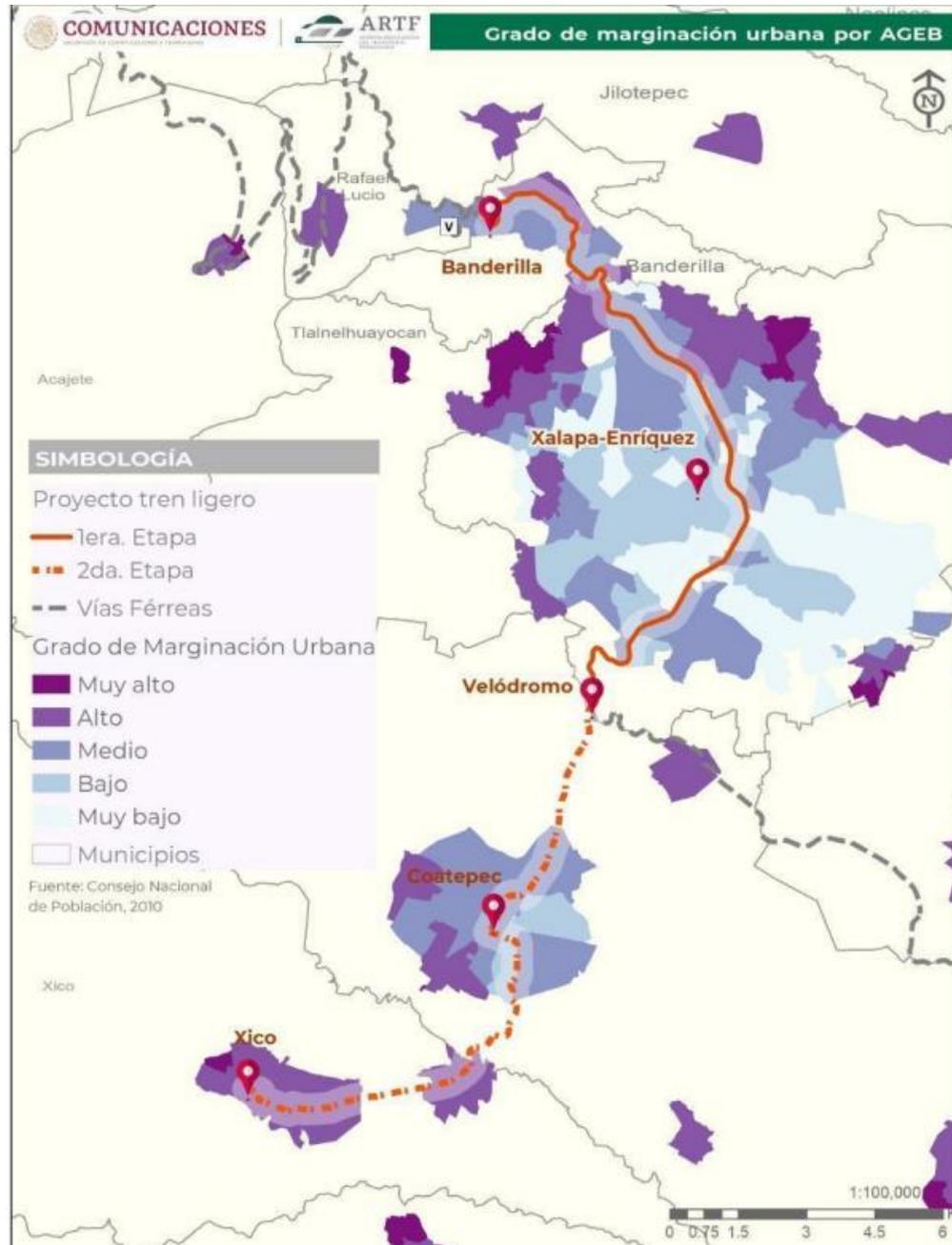
lo que mejorar el transporte público en México además de promover la posibilidad de moverse con mayor facilidad a puntos de recreación, compras, centros culturales, entre otras, mejora las condiciones de vida de manera directa en la población a su economía, salud física y mental.

En Xalapa el gasto considerable en transporte no es la excepción, ya que una actividad rutinaria para muchos estudiantes de la región como es el asistir a la Universidad los lleva a tomar en promedio dos autobuses, implicando \$18 diarios de un solo viaje, viaje de ida y vuelta \$36 impactando directamente en su economía (Gobierno de Veracruz, 2020). La integración del sistema de transporte público tram-tren en Xalapa dará la pauta de promover el uso de transporte público, ya que los viajes serán más cortos y baratos a comparación del automóvil, incentivando su desuso y prefiriendo en transporte público por el ahorro económico y la comodidad que provee una red bien planeada.

En el caso particular de Xalapa, la línea férrea coincide con diferentes puntos de alta y muy alto grado de marginación, lo que da la oportunidad de servir al sector más vulnerable otorgando la movilidad que merecen, dando oportunidad de conectarse con mayor facilidad. En la Figura 18 se muestra que las zonas de grado de marginación muy alto y alto que serían directamente beneficiadas con el proyecto.

Figura 18

Grado de marginación de la zona metropolitana de Xalapa



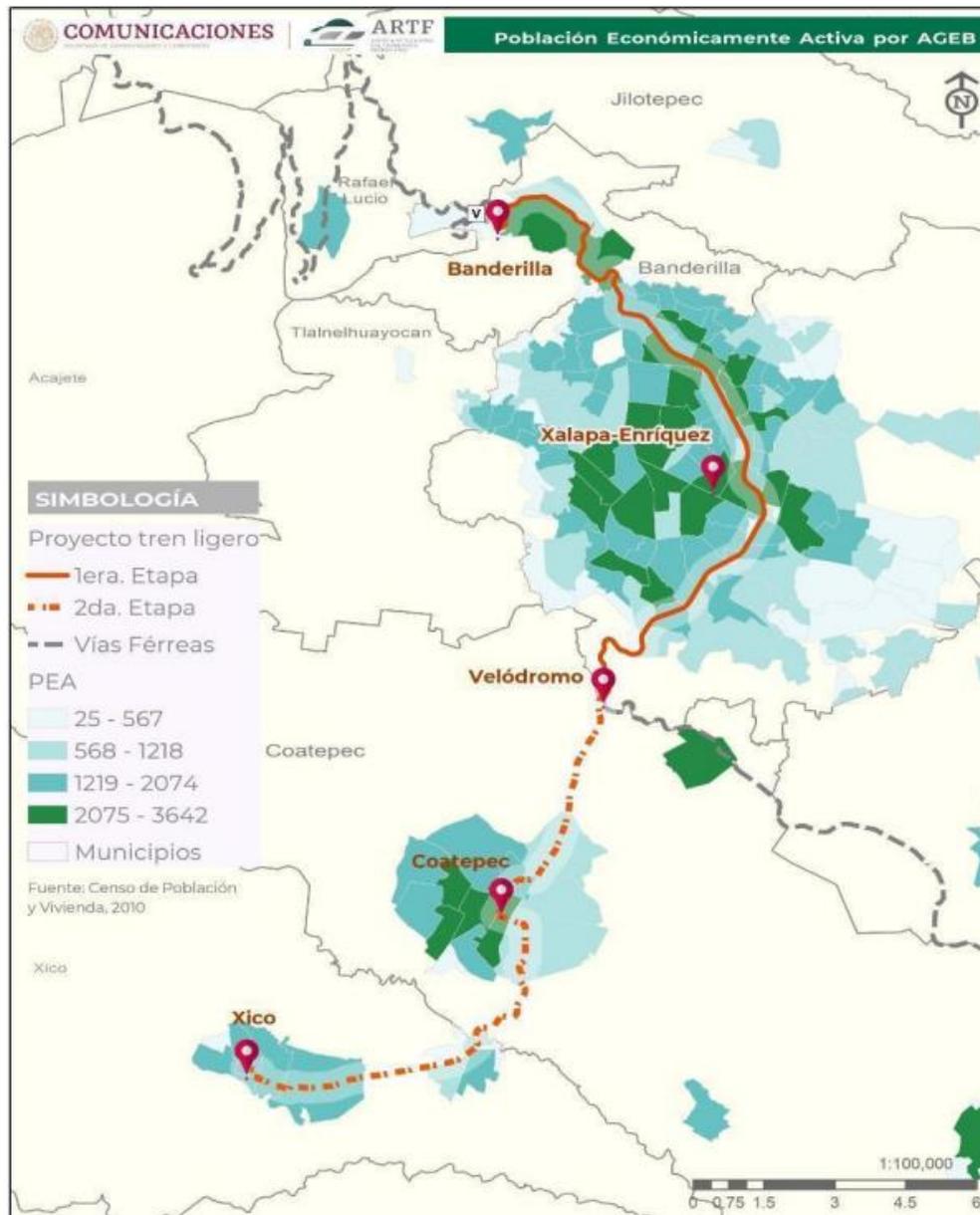
Fuente: ARTF,2019.

Otro punto importante que es necesario abordar para conocer las condiciones actuales de la región es la población económicamente activa. Xalapa es una de las economías más grandes del estado, específicamente en la prestación de sector de servicios públicos, educación, investigación y comercio. La economía de Xalapa representa un 4% del PIB estatal y un 80% de la producción a nivel municipal la cual se integra principalmente del sector de servicios financieros e inmobiliarios, comercio e industria (ARTF, 2019).

En el caso de la población económicamente activa como puede observarse en la Figura 19, muchas de las zonas con mayor población económicamente activa coinciden con la propuesta del tren, pero igual otras zonas con bajo porcentaje también coinciden, lo que abre oportunidad a que las zonas con índices bajo se vean favorecida por la integración del corredor, dando oportunidad a una implementación de un corredor no solo ferroviario si no comercial, motivando a comercios en las estaciones, ofrecer servicios que generar riqueza y por lo tanto dan seguridad económica a la sociedad, mientras que a las zonas económicamente activas también serán beneficiadas con incrementos su productividad y ganancias.

Figura 19

Población económicamente activa en la zona conurbada de Xalapa.



Fuente: ARTF,2019.

Con la implementación de sistema de transporte propuesto, las condiciones de pobreza y marginación actuales pueden erradicarse gracias a la activación de la actividad ferroviaria de pasajeros, por la implementación de actividades económicas que se generarán alrededor de cada estación y de las terminales. (ARTF, 2019). Como en el caso de Ciudad de México, en cada estación se encuentran tiendas de autoservicios, bancos, plazas comerciales, restaurantes y hasta tianguis, ahora el sistema de transporte es el que dicta los puntos de comercio, el acceso al transporte público beneficia que más personas conozcan un nuevo negocio, por el hecho de tener un fácil acceso. El corredor ferroviario además de transportar impulsa la economía de la zona, beneficiando al comercio, mediante la implementación de tiendas, restaurantes, cafeterías y centros comerciales que presten servicio a los usuarios.

En los últimos años se presentó una disminución del crecimiento porcentual de la circulación de volumen vehicular en Xalapa, pero esto no genera una solución real ni duradera a la región, ya que muchas de sus calles se encuentran colapsadas por el gran número de automóviles que circulan diariamente, además que la carencia del sistema de transporte actual genera que la población no apueste por dejar su vehículo. (Gobierno del Estado de Veracruz, 2019)

Hay que destacar que esta tesis no es la primera que estudia un punto de vista sobre la factibilidad del proyecto del tram-tren o Tren ligero de Xalapa, ya que se han realizado algunas otras en diferentes niveles y detalle de estudio en los últimos diez años. En el 2011 fue realizado el primer estudio por medio de la tesis de maestría de la Universidad de Stuttgart Alemania, por el Doctor David Camacho Alcocer. Con esta tesis él propuso el proyecto de

integrar un tram-tren en Xalapa y los beneficios que traería integrar este transporte a la región logrando conceptualizar y promover la implementación de un tren.

Este estudio preliminar del cual se llevó a cabo con criterios urbanos y operativos definió que el corredor presenta características importantes para desarrollo de un proyecto de manera correcta y eficiente, utilizando infraestructura de manera multifuncional y optimizada como un sistema de tren ligero tram-tren en una vía con uso mixto. Se explicó la necesidad de una mejora del corredor para adecuarlo a las necesidades de capacidad que se requiera para un sistema eficiente, utilizando el derecho de vía existente.

Dentro del estudio se identificó la necesidad de generar un desarrollo urbano adecuado para los ejes de movilidad propuestos, para que el proyecto cuente con mayor éxito y generar una mayor conectividad, accesibilidad y cobertura y una política pública que detenga la expansión urbana que está sufriendo la región.

Además, existe otro estudio publicado en el 2020 por el Mtro. Mauricio Villareal Muñoz, en el cual se realiza un estudio de capacidad del tren ligero de Xalapa por medio de métodos de simulación y con la que también se basa este estudio para contrastar resultados y lograr conclusiones más robustas.

Con esta tesis se busca determinar la capacidad ferroviaria por métodos analíticos con la que cuenta el corredor, y determinar las características mínimas de la infraestructura para que la operación mixta sea posible por lo que en este apartado sobre antecedentes pretende que los lectores conozcan las condiciones actuales de la región, tanto social y económicas.

Estos datos son importantes para conocer la situación en la que se encuentra la ciudad y como se mejoraría por la implementación de este sistema de transporte masivo de pasajeros, como se ha manejado a lo largo del desarrollo de la tesis el implementar un sistema de transporte como un tren ligero o tram-tren no se trata simplemente de aspectos técnicos, si no que transforma todo un entorno, abre puertas para movilidad, detona economía, da acceso al transporte, seguridad, moderniza una ciudad y sobre todo mejora la calidad de vida de todos los habitantes.

1.8 Descripción de la propuesta del proyecto del Tren Ligero de Xalapa

Xalapa al igual que Karlsruhe cuenta con una línea férrea utilizada exclusivamente para trenes de carga con bajo tráfico ferroviario y además el corredor coincide con la mayoría de los puntos de atracción de viajes en la región, lo que facilita enormemente la implementación de un sistema de transporte masivo, siendo un ambiente idóneo para su desarrollo y sirviendo como ciudad “piloto” para su futura expansión a otras zonas del país.

Si bien es cierto que el tram-tren de la zona conurbada de Xalapa no dará servicio al centro de la ciudad en una primera etapa, en un futuro podría realizarse una extensión para cubrir la demanda de la zona, además que para la segunda etapa del proyecto que planea extender su servicio a Coatepec y Xico, en esta propuesta el tram-tren si circularía en el centro de esas localidades, por lo que aun que el sistema de tren ligero que se propone implementar en Xalapa se basa en muchas de las características del modelo Karlsruhe , es cierto que el sistema se debe adaptar a las propias necesidades que presenta Xalapa con su área conurbada, ya que como se plantea en el Perfil del Proyecto, el tren de Xalapa se podría llamar como: “sistema Xalapa”, por las particularidades y retos que representa. La propuesta es utilizar las

vías existentes en la ciudad implementando el servicio de pasajeros con servicio de carga en un primer momento los trenes de pasajeros serán Diesel, para posteriormente evaluar e ir electrificando la red que permita la integración de trenes eléctricos, conectando ciudades cercanas a Xalapa y posteriormente viajes más alejados. (ARTF,2019)

Otra de las propuestas que surge en la integración de tren de pasajeros en la región, es la posibilidad de introducir un tren turístico, el cual conecte a Xalapa con los pueblos mágicos de Coatepec y Xico, ya que con este servicio se promovería el turismo y economía de la región. En Karlsruhe se integró un tram-tren turístico, que consta de unidades con vista panorámica, cafetería y mesas, este tren visita la zona de la selva negra, haciendo posible el servicio turístico en esa zona de Alemania. (ARTF, 2019)

El proyecto de realizar un Tren Ligero de la Región de Xalapa surge bajo la idea de mejorar el sistema de transporte público existente otorgando a la zona un transporte masivo que brinde un servicio ordenado y troncal, que promueva la integración de todos los modos de transporte en la región y con esto mejore la calidad de vida para alcanzar un mayor bienestar social.

Se pretende que la zona metropolitana de Xalapa, la cual está conformada por siete municipios consolide una idea de área metropolitana y así poder trabajar coordinados e implementando políticas públicas comunes. (ARTF, 2019).

El corredor ferroviario de Xalapa es parte de la línea que une al puerto de Veracruz con la Ciudad de México y este último con los Estados Unidos de Norteamérica a través de la ciudad de Tamaulipas. Esta línea férrea corresponde a la línea V que se encuentra actualmente

concesionada por 50 años a Kansas City Southern de México S.A. de C.V. (KSCM) esta concesión prorrogable a 50 años más actualmente lleva transcurrido 25 años.

El proyecto se pretende operar entre tramo de dicha línea a partir del km 322+000 al 340+000 entre los municipios de Banderilla y Xalapa, esto comprendiendo como fase 1 del proyecto, como se puede observar en la Figura 20. El segundo tramo comprenderá hacia el municipio de Coatepec concluyendo en Xico como fase 2 del proyecto. (ARTF, 2019)

La línea férrea actualmente atraviesa la ciudad de norte a sur, desde la salida de Banderilla, hasta la salida con Coatepec. Dando las mismas ventajas tanto al lado izquierdo y derecho de la ciudad.

Figura 20

Trazo del ferrocarril y las estaciones propuestas del Tren Ligero de Xalapa



Fuente: ARTF,2019

Actualmente, la línea cuenta con bajo tráfico ferroviario, por lo que no representa un problema al concesionario el implementar un transporte de pasajeros, ya que el tren de carga funciona como transporte de paso, moviendo mercancía del Puerto de Veracruz hacia la Ciudad de México. El tren de carga en la ciudad de Xalapa únicamente realiza paradas para transportar cartón o llega a realizar maniobras, por lo que las operaciones de pasajeros no interrumpirían el servicio, en caso de optimizarse el uso mixto de la vía, lo que daría una gran ventaja para su pronta implementación. (KSCM, 2020)

En el año 2019 se realizó una ampliación al Puerto de Veracruz para recibir mayor volumen de carga, a pesar de ello, el tráfico ferroviario de carga sigue siendo de intensidad baja, por lo que no representa un obstáculo para la operación mixta, una vez el aumento de tráfico ferroviario se intensifique en su frecuencia y largo de trenes, se deberá realizar un nuevo ejercicio de evaluación modificando la operación mixta de la vía, argumentos que serán expuestos en capítulos posteriores, donde se lleve a cabo el análisis de la operación de carga.

El estado de conservación actual de la vía es precario. Además de factores sociales y económicos, la vía ha representado una barrera que evidencia el deterioro urbano y ambiental, sin dejar de mencionar los asentamientos irregulares dentro del derecho de vía, que perjudican al entorno por falta de servicios. Aunque es importante aclarar que ninguna de estas invasiones resulta perjudiciales al derecho de vía tal como se observa en la Figura 21, son invasiones que no obstaculizan la implementación del proyecto, por lo que eso representa un gran punto a favor para su ejecución.

Figura 21

Irregularidades en el trazo férreo de Xalapa. Situación actual de la línea V utilizada como andador peatonal y algunas viviendas irregulares al costado de la línea con deterioro ambiental.



Fuente: ARTF, 2019

1.6.1 Estaciones del proyecto del Tren Ligero de Xalapa

El proyecto de Xalapa tiene una longitud de 17.8 km en la fase 1, que cubre los municipios de Xalapa y Banderilla directamente, en la fase 2 de 15.2 km los municipios de Coatepec y Xico, tal como se esquematiza en la figura 22.

Figura 22

Fases del proyecto del Tren Ligero de Xalapa.



Fuente: ARTF

Las estaciones propuestas (ver Figura 23) para el proyecto del tren de la región de Xalapa que serán tomadas en cuenta para el estudio de esta tesis son:

- 1. Estación Terminal Banderilla**
- 2. Banderilla La Calera**
- 3. Salvador Díaz Mirón**
- 4. Avenida México**
- 5. División del Norte**
- 6. La Antigua Estación del Tren**
- 7. Jardines de Xalapa**
- 8. Plaza Cristal**
- 9. CAXA**
- 10. Murillo Vidal**
- 11. Enrique Rébsamen**
- 12. USBI-UV**
- 13. Velódromo**
- 14. Patio de maniobras**
- 15. Terminal Velódromo**

Figura 23

Estaciones propuestas del Tren Ligero de Xalapa.



Fuente: ARTF, 2019.

Todas estas estaciones fueron determinadas con base a el estudio de 2017 “Estudio de Demanda de la Red Primaria de la Zona Conurbada de Xalapa-Banderilla-Emiliano Zapata” el cual se basó en encuestas origen-destino, así como en la propuesta del Dr. David Camacho del cual en su estudio identificó 11 estaciones desde Banderilla hasta la estación Velódromo en Xalapa, la ubicación de las estaciones se basó en el análisis de diferentes indicadores que buscan alcanzar al mayor número de usuarios y además se consideraron radio de influencia de 500 metros en las zonas densas y en zonas suburbanas 1000 metros. Las primeras 11 estaciones que se determinaron en la Tesis del Dr. Camacho fueron complementadas por la SIOP, respecto a varios edificios de valor histórico y recuperación de algunos centros culturalmente importantes en la ciudad, como es el caso de la estación Enrique Rébsamen que cuenta con un antiguo parador que se pretende ser conservado con la implementación del tren.

Los antecedentes expuestos en este capítulo tienen como objetivo que el lector cuente con un panorama general sobre los alcances del proyecto y observe claramente el objetivo que se pretende lograr con esta investigación, ya que en capítulos posteriores se desarrollaran temas técnicos que involucran conocer primero el desarrollo social y económico de la zona que fueron abordados descritos para el lector.

Capítulo II.-Marco Teórico

II.1 Capacidad ferroviaria

Determinar la capacidad ferroviaria de cualquier proyecto no es tarea sencilla, ya que involucra el contar con conocimientos previos que faciliten su desarrollo y comprensión del método a utilizar. Esta tesis pretende ser lo más amigable posible con el lector, por lo que se incluyen los antecedentes necesarios para poder comprender y desarrollar la metodología aquí propuesta.

El término capacidad ferroviaria es un término difícil de generalizar, complejo, con muchas definiciones vagas o deficientes, hasta la misma Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) en el 2004 declaró que “la capacidad ferroviaria, como tal, no existe, sino que depende de la forma en que se utilice la infraestructura ferroviaria” (p. 16).

Mientras en el UIC code 406 publicado en el 2012, define a la capacidad ferroviaria como: “número máximo de trenes que pueden transitar en una vía, nodo o corredor. El volumen de tráfico es basado en estrategias y estudios enfocados a la infraestructura e identificación de cuellos de botella”. (p.13)

Por su parte Rotoli, F., Navajas Cawood, E., Soria, A, en el 2016, definieron a la capacidad ferroviaria como: “el número máximo de trenes que pueden operar utilizando concurrentemente una parte específica de la infraestructura durante un periodo de tiempo dado y con un nivel fijo de servicio.” (p. 10) Dentro de las características de infraestructura que sustentan la capacidad se encuentran, por ejemplo, los sistemas de señalización, horario, material rodante y el rango de puntualidad impuesto para operar al sistema (Arne I. & Pachl J,2014). Mas adelante, en este capítulo, se hará mención, de manera breve, de las

implicaciones de cada una de estas características, así como de su influencia en la reducción o aumento de la capacidad.

Para fines de esta investigación se aceptará la propuesta de Márquez (2011) como la definición más cercana al objetivo de este proyecto: el término “capacidad ferroviaria” se define como un número máximo de trenes que pueden transitar en dos direcciones de una línea durante un periodo de tiempo determinado.” (p. 13), del cual su calidad del servicio se ve representado por la puntualidad y la seguridad.

El propósito del cálculo de capacidad ferroviaria se resume a la programación del sistema para el despacho seguro de trenes, con la cual (Arne I. & Pachl J,2014):

- Se coordina la operación de los trenes para el uso óptimo de la infraestructura.
- Garantiza la seguridad.
- Se obtienen horarios para trenes de pasajeros, ya que es necesaria crear certeza y puntualidad para que un servicio de transporte sea funcional.

II.1.1 Factores que afectan la capacidad ferroviaria

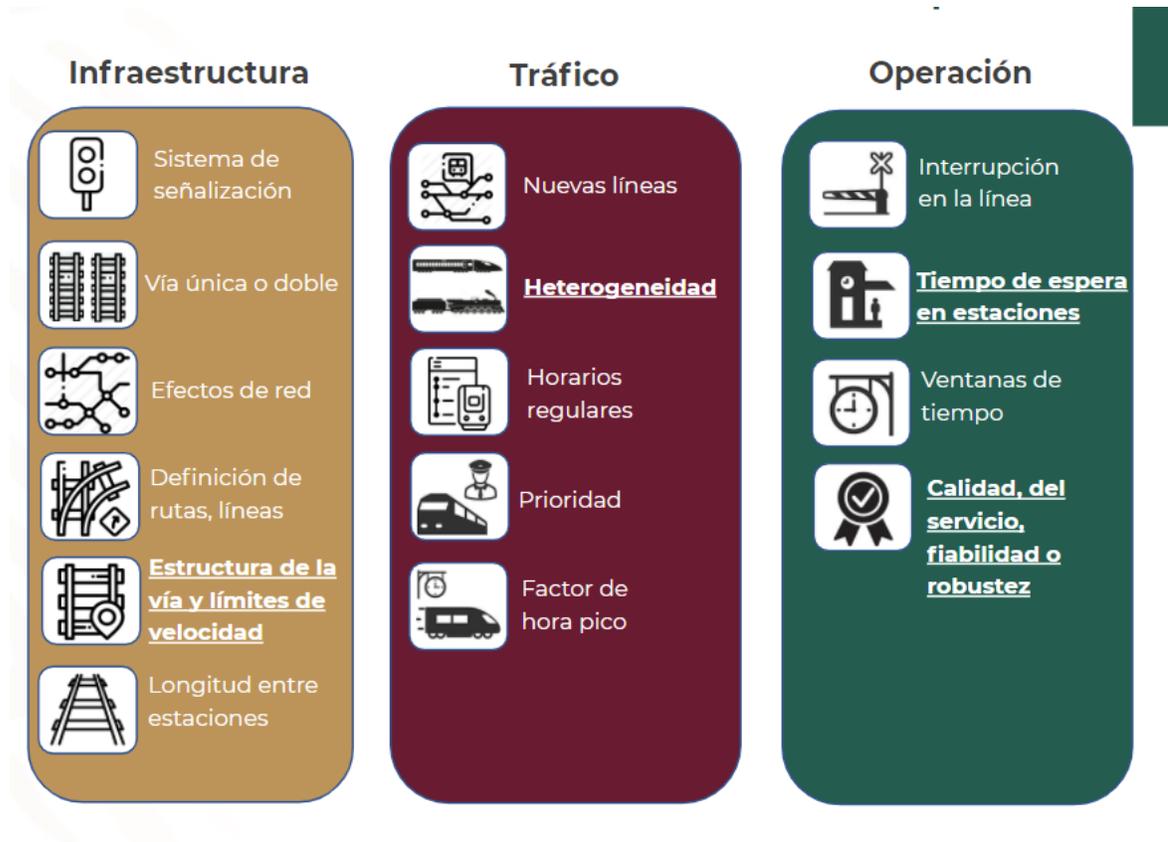
La capacidad ferroviaria no es valor estático, ya que puede ser modificado de acuerdo con su uso. Se ve afectado por varios parámetros técnicos que pueden ser modificados para disminuir o aumentar la capacidad del sistema. (Ricci, 2011):

De acuerdo con la investigación del Dr. Abelardo Pretelín publicada en el 2019 en su ponencia: “Una evaluación de la capacidad Ferroviaria”, los parámetros fundamentales que

afectan la capacidad ferroviaria se subdividen en infraestructura, tráfico y operación tal como se expone en la Figura 24:

Figura 24

Parámetros que afectan la capacidad ferroviaria.



Fuente: Dirección General de Estudios, Estadística y Registro Ferroviario Mexicano, (2019)

Cada parámetro es explicado con más a detalle a continuación:

Parámetros de infraestructura:

- Cantones y sistema de señalización: El objetivo de la señalización es la seguridad en el sistema, las señales muestran a los conductores la distancia segura de circulación del tren permitiendo al conductor ampliar la visibilidad y alcanzar una mayor velocidad sin ocasionar una colisión adelante. Con la señalización se determina la distancia segura entre dos trenes evitando accidentes. La señalización puede ser fija o móvil. La señalización fija muestra la separación entre trenes fijo, manteniendo siempre restricciones entre un cantón, cada cantón debe ser ocupado por un solo tren a la vez, en estas señales lo más importante es la longitud del cantón y la longitud de los trenes, así como la velocidad en la que puede transitar el tren en cada cantón. Por su parte la señalización móvil es un sistema moderno en el cual se da la posición del tren en tiempo real, lo que permite que los cantones se vayan ajustando de acuerdo con la posición actual del tren, permiten mayor capacidad, pero son sistemas muy costosos, pero con un alto grado de seguridad.
- Vía simple y doble: El aumento de la capacidad no es directamente proporcional al aumento de vías, por ejemplo, si un tramo ferroviario de vía simple se aumenta una vía doble la capacidad aumenta aproximadamente cuatro veces, pero sí de vía doble se aumentan cuatro, la línea solo aumenta su capacidad un 50%, por lo que no es lineal el aumento de capacidad por aumento de vías, además que la construcción de vía es muy costosa, por lo que debe aplicarse cuando sea absolutamente necesario.
- Definición del servicio en la ruta: deben estar programadas las paradas y estaciones en la línea férrea. Si existe más de una línea la capacidad se obtiene sumando la

capacidad de cada una de las líneas y determinar donde se ocasionan cuellos de botella.

- Efectos de red: se deben considerar los efectos de la vía en la red completa, por ejemplo, si existe interferencia o no con el sistema.
- Estructura de la vía y límite de velocidad: el estado actual de la vía y grado de mantenimiento en rieles, balastro, la alineación, las pendientes, trazo de curvas determinan la velocidad de operación permitida, ya que se determina velocidades de operación segura de acuerdo con el estado de la vía.

Parámetros de tráfico:

- Línea nueva o existente: la capacidad cambia si es que la línea férrea es nueva, o bien que será diseñada para el proyecto en específica o una línea existente que será adaptada para un nuevo uso, en este caso la capacidad se verá afectada ya que la vía ya cuenta con restricciones previas, por lo que el nuevo sistema se implementará bajo esta configuración por lo que se debe adaptar a la situación disponible, haciendo la capacidad limitada.
- Combinación de trenes: la capacidad máxima se obtiene cuando todos los trenes que circulan sobre la vía son idénticos, con las mismas características dinámicas y transitan a la misma velocidad, pero en la mayoría de los sistemas férreos esto solo es un ideal ya que en la realidad la mezcla de diferentes tipos de trenes generan retrasos, ya que las velocidades de circulación son distintos entre ellos y se debe programar entrecruzamiento en zonas específicas, además que la aceleración y desaceleración también son diferentes y si afecta el sistema.

- Horarios regulares: en la programación de horarios idealmente se realiza con trenes idénticos en intervalos de tiempo fijo, pero en realidad se requiere dar prioridad de uno sobre otros y no se sabe de varios de ellos con antelación su frecuencia.
- Factor de hora pico: en cierto horario en la red existirá una demanda mayor de trenes, por lo que en ese horario la red se encontrará con mayor saturación, es importante conocer este nivel de tráfico necesario para satisfacer la demanda, ya que podría ser que la línea no pueda satisfacerla.
- Prioridad: la prioridad disminuye la capacidad ya que al programar unos trenes sobre otros provoca retrasos en el sistema, lo que se traduce a que mientras mayor sea el número de clases de prioridad la capacidad disponible es menor. Regularmente la prioridad de los trenes se da por la velocidad que alcanzan, los trenes más rápidos tienen prioridad sobre los más lentos, esto no es necesariamente siempre aplicado, pero es un parámetro que influye altamente.

Parámetros de operación:

- Interrupción en la línea: son los tiempos considerados para el mantenimiento, las paradas comerciales o eventos no programados como fallas de trenes, interrupción a la operación, etc., ocasionando que la vía no preste servicio por un lapso, reduciendo el horario para marcha de tren.
- Tiempo de espera en las estaciones: es el tiempo en el que el tren se encuentra detenido en la línea.

- Ventana de tiempo: es el intervalo de tiempo en el que la línea estará en operación, por lo regular se establece en una hora o todo el día laborable.
- Calidad de servicio, fiabilidad o robustez: debido a que la operación del tren no es continua, ya que existen demoras por fallas, perturbaciones aleatorias, por lo que para determinar la confiabilidad del servicio se necesita determinar el nivel de capacidad económico óptimo, por lo que cuando los trenes superan el nivel de saturación se pierde la fiabilidad en la red. Por lo que no es rentable aumentar el número de trenes más allá del nivel de saturación.

Cada factor tiene la posibilidad de modificarla capacidad del sistema a diferente escala, ya sea aumentándola o disminuyéndola, esto, dependiendo de la combinación de factores implementada (p. ej. el uso de doble vía combinado con un sistema de señalización y control moderno conlleva a incrementar el número de trenes si se compara con otro escenario de doble vía que no integre dicho sistema, aunque a la velocidad promedio de recorrido, por lo que es importante tener conocimiento de las características particulares del proyecto, ya que cuando se desea aumentar la capacidad debe existir una jerarquía de cambio, en el cual se ordene de la más favorable a la menos favorable o prácticamente inviable, considerando para esto, los costos y la complejidad asociada de cada posible solución planteada

En el caso particular de Xalapa, se tomaron las consideraciones basadas en la tesis del Mtro. Villareal M. (2020), en donde se evalúa la capacidad del Tren ligero de la Región de Xalapa por medio de métodos de simulación (explicado en el apartado 2.3.3). En ella se realiza una consideración de que los factores que conviene modificar en Xalapa por orden de

facilidad en su implementación y los cuales serán igualmente considerados en esta investigación, son:

1. Señalización.
2. Aumento de vías de circulación mediante la construcción de vía nueva.

La toma de decisión sobre modificar principalmente estos dos parámetros se debe a que la línea ya construida es actualmente operada para trenes de carga por la empresa Kansas City Southern de México (KCSM), por lo que, como ya se mencionó anteriormente el acuerdo con el concesionario es que su operación se vea afectada mínimamente.

En cuanto a los parámetros que afectan el nivel de servicio, estos se reflejan sobre todo en cambios en velocidad media del tren y en la estabilidad de los horarios, aunque por complejidad, estos son poco considerados, hasta en los análisis más detallados.

II.1.2 Tipos de capacidad ferroviaria

La capacidad ferroviaria se encuentra clasificada principalmente en cuatro grandes grupos (Rotoli, F., Navajas Cawood, E., Soria, A, 2016):

- Capacidad teórica: Es el número máximo de trenes que pueden circular en un tramo ferroviario en un tiempo definido, con situaciones ideales generados bajo condiciones matemáticas, calculado por medio de una fórmula empírica, con el intervalo mínimo ideal. Esta capacidad no existe en la realidad, es una idealización de un sistema perfecto, representando el límite superior del sistema.

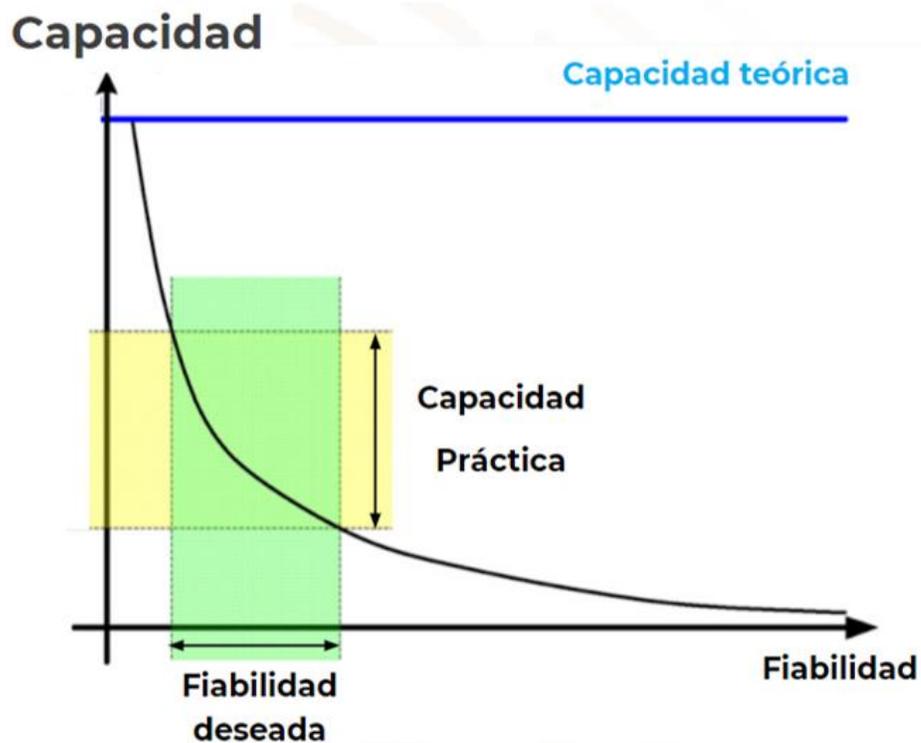
- Capacidad práctica: está definida como el número de trenes que pueden circular sobre un tramo ferroviario bajo un esquema real, considerando demoras, retardos, mezcla de diferentes tipos de trenes, entre otras. Es un número realista de trenes que pueden circular, con un nivel razonable de confiabilidad, se basa en características del sitio y en la operabilidad del sistema. Representa generalmente de un 60% a 75% de la capacidad teórica.
- Capacidad utilizada: es el volumen de tráfico que es utilizada actualmente en la red. Generalmente menor a la capacidad práctica.
- Capacidad disponible: está representando por la diferencia entre la capacidad práctica y la capacidad utilizada. Conocer este valor es indispensable para determinar cuántos trenes se pueden agregar al sistema.

En la Figura 25 se muestra la relación entre la capacidad teórica y práctica respecto de la fiabilidad de un sistema ferroviario. Fiabilidad se entiende por certeza de que la circulación del tren sea puntual, no se presente retrasos importantes y que el tránsito sea seguro y preciso. Por eso se requiere obtener la capacidad real del sistema o capacidad práctica y con ella programar el despacho de trenes, en esta Figura 22 se muestra como la capacidad teórica o ideal se encuentra ubicada en el límite superior sobre el eje de las ordenadas lo que simboliza la máxima capacidad que se puede obtener de un sistema ferroviario bajo estudio, sin embargo la confiabilidad de dicho sistema describe un escenario ideal que no puede ocurrir en la realidad, sin demoras, sin retrasos, trenes idénticos, velocidades constantes, etc. En el caso de la capacidad práctica, se encuentra por debajo de la capacidad teórica ya que describe

la influencia o afectación de retrasos, cruces a nivel, condiciones de operación en el número de trenes, describe de manera más cercana la realidad del sistema, por lo que la capacidad práctica es una capacidad que representa un escenario confiable, ya que integra todos aquellos factores no considerados durante el cálculo de la capacidad teórica.

Figura 25

Correlación entre la capacidad teórica y la confiabilidad



Fuente: Rotoli et al, 2016

II.2 Metodologías para el análisis de capacidad ferroviaria

El cálculo de capacidad ferroviaria siempre ha representado un problema en el sector, debido a que existe información limitada o poco detallada, sobre todo para las personas con poco dominio o experiencia. Para el cálculo de capacidad ferroviaria existen diferentes herramientas, unas más complejas que otras, pero todas con el mismo objetivo de obtener el número máximo de trenes que pueden circular en una línea férrea en un lapso e infraestructura determinada.

Los diferentes métodos para el cálculo de capacidad ferroviaria se dividen en tres: los métodos analíticos, métodos de optimización y métodos de simulación. Cada metodología cuenta un nivel distinto respecto a la profundización de conocimientos y el detalle alcanzado. Cada una de estas metodologías implica diferencias en la cantidad de tiempo, recursos y experiencia requeridos.

Muchos autores contemplan que los métodos analíticos, optimización y simulación resultan ser complementarios entre sí, ya que algunos nos proporcionan ideas iniciales sobre capacidades esperadas (p. ej. los métodos de tipo analíticos), mientras otros determinan con mucha precisión fenómenos particulares del sitio (p. ej, los métodos de simulación), pero requieren de información más específica y una inversión mayor de recursos (Rotoli, F., Navajas Cawood, E., Soria, A, 2016).

Otros autores consideran que los métodos además se respaldan unos con otros: ya que, si desde los estudios preliminares no se obtiene la capacidad ferroviaria esperada para un sistema, no sería adecuado continuar con los métodos de optimización y simulación. Se

podrían describir como una especie de escalones del cual el: nivel 1 correspondería a los métodos analíticos, nivel 2 métodos de optimización y nivel 3 métodos de simulación.

Los resultados obtenidos en los diferentes métodos pueden variar, pero regularmente se esperaría que se llegara a resultados muy cercanos, por lo que las variaciones que se presentan se deben principalmente al grado de especificación que se maneje de un método respecto al otro. Por lo que las diferentes metodologías evalúan la capacidad a distintos niveles de detalle.

II.2.1 Métodos analíticos

Los métodos analíticos son los estudios que requieren de menor conocimientos previos sobre ferrocarriles además que para la aplicación de las ecuaciones se requiere el mínimo de información en comparación con los otros dos métodos, son estudios de escasa complejidad. Representan una excelente alternativa para dar un comienzo a identificar las limitaciones que presenta el tramo ferroviario estudiado y se logra obtener soluciones preliminares a la ejecución del proyecto, se aplica sobre todo para fines comparativos o bien para referencia como punto de partida, ya que conducen a resultados útiles sin llevar a un análisis exhaustivo como lo suelen ser los métodos de simulación.

Los métodos analíticos como describe Márquez (2011) son diseñados para modelar el entorno ferroviario por medio de fórmulas o expresiones matemáticas, a partir de estas se obtienen capacidades teóricas que posteriormente al aplicar al resultado un intervalo del 60% al 75% se obtiene la capacidad práctica del sistema.

Existen distintos métodos analíticos utilizados alrededor del mundo, por lo que vale la pena notar que los resultados entre un método y otro suelen variar debido a los supuestos utilizados para obtener dicha expresión algebraica, así como de los parámetros o variables considerados.

Existen distintos aspectos importantes a considerar antes de iniciar con el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos como lo es:

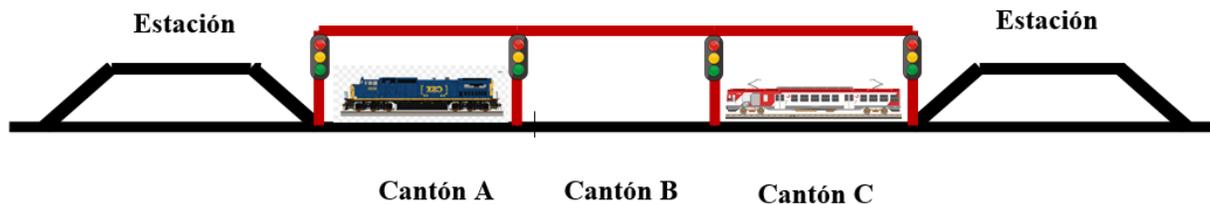
- Si se planea utilizar la infraestructura actual o mejorarla.
- Largo de línea.
- Si el modelo que se utilizará para su estudio corresponde a uno de tipo determinístico o dinámico.
- Modelo de capacidad y procesador de datos.
- Si se utilizará un sistema de simulación.
- Propuesta del estudio.

Vale la pena explicar que no es posible otorgar un valor único de capacidad a toda una red ferroviaria, por lo que para el análisis de la línea se suele subdividir y con esto se obtienen valores respecto a la sección. Los métodos analíticos se basan en las teorías de colas, en la cual se subdivide la línea férrea en varias secciones iguales llamadas cantones. (Ver Figura 26). Los cantones son tramos de vía en la que no puede haber más de un tren, con el fin de evitar colisión, son las distancias mínimas de seguridad para poder frenar y no ocasionar accidentes en la línea. Mientras más corto sean los cantones se aumenta la capacidad, pero de igual manera se debe integrar sistemas de operación más seguros, ya que con más facilidad

puede existir un choque de tren. Los cantones más largos proporcionan más seguridad, pero crean sistemas ineficientes. Esta separación depende de los siguientes criterios (Arne I. & Pachl J. ,2014).

Figura 26

Explicación gráfica de un cantón ferroviario



Fuente: Elaboración propia.

- Sistema de control: autoriza los movimientos del tren en la vía. Los sistemas de control ferroviarios pueden ser desde los más sencillos (por medio de radio) o sistemas más complejos, como lo son sistemas de control computarizados que se dan en centros de mandos equipados y que transmiten señales por medio de fibra óptica. Un sistema de control determina si un cantón es fijo o móvil. Los cantones fijos son aquellos que ya están definidos por secciones determinadas a lo largo de la vía y no van a cambiar, mientras que los cantones móviles serán monitoreados en tiempo real por medio de los sistemas de control y serán cambiando respecto a la posición del tren en cada momento.

Cada cantón puede ser ocupado por un solo tren, por lo que para un bloque se encuentre liberado debe:

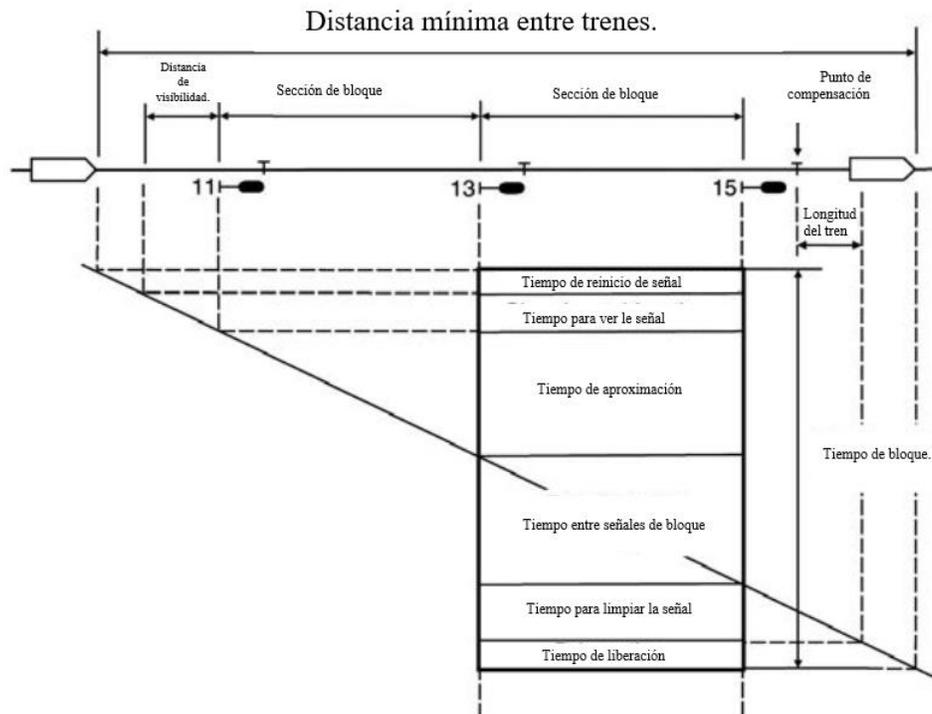
- El tren que va adelante debió transitar completamente el bloque.
- El tren de adelante debe estar protegido por una distancia por cualquier movimiento no planeado.

Estos bloques cuentan con el objetivo de mantener la operación de los trenes de manera segura, los tiempos de bloqueo de una sección son más largo de lo que realmente ocupa un tren, ya que considera los siguientes intervalos:

- El momento en que la señal se borra y vuelve a pasar a cero.
- Tiempo para que el conductor vea la siguiente señal.

Figura 27

Gráfico de características mínimas entre trenes



Fuente: Arne I. & Pacht J. (2014).

A nivel de red es posible obtener un valor de capacidad global, el cual se ve representado por el valor más desfavorable de las secciones de bloques propuestas. La capacidad del sistema la da el valor más bajo obtenido de todos los bloques de la red.

II.2.2 Métodos de optimización

Algunos autores describen a los métodos de optimización como parte complementaria de los métodos analíticos (ver Sección 2.2), ya que es necesario contar con un horario formulado para optimizarlo, mientras que para otros autores este método es considerado completamente independiente. Se entiende como horario al conjunto de datos que definen todos los

movimientos planificados en los trenes y material rodante que tendrán lugar en una infraestructura determinada en el periodo de tiempo explicado en el horario vigente (RAE,2020). Un horario ferroviario busca dar certeza de puntualidad al usuario y con esto una alta calidad de servicio, ya que el usuario sabrá cuando transitan los trenes y en base a esa información planear sus actividades y tiempo óptimamente. Para aplicar el método se requiere además conocer el nivel de servicio aceptado y retrasos que se consideren admisibles.(Arne I. & Pachl J.,2014).

Uno de los métodos de optimización más utilizado es el presentado en el UIC 406 elaborado por la Unión Internacional de Ferrocarriles en el 2012, el cual busca minimizar los tiempos entre trenes, generando que el tiempo de despacho entre trenes sea el mínimo posible.

II.2.3 Métodos de simulación

Debido a que los métodos de simulación son los más complejos, se recomienda que estos sean empleados en la etapa de ejecución del proyecto donde exista certeza de la realización de este, así se justifica su costo y complejidad.

Con los métodos de simulación además se pueden optimizar variables como velocidad, señalización, etc., con lo que se logra tener horarios saturados, ya que es posible maximizar la capacidad de la vía bajo estudio al programar los trenes tan cerca como sea posible.

Los métodos de simulación son desarrollados utilizando software especializado creado por empresas dedicadas a la simulación del transporte o inclusive desarrollado en universidades como, por ejemplo, Berkeley, Estados Unidos o El Instituto de Ferrocarriles y

Transporte en Alemania. Sin embargo, varios de estos programas, que se encuentran disponibles en el mercado, presentan costos extremadamente elevados, lo que representa una gran desventaja para este tipo de metodología. Aunado a esto, este tipo de estudios requieren de personal altamente capacitado, por lo que el costo de su manejo aumenta.

Capítulo III.- Metodología para el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos

III.1 Descripción de la metodología

El objetivo primordial de esta investigación es el desarrollo de una metodología para el cálculo de capacidad de vía a través del uso de métodos analíticos. Es intención de este proyecto establecer un marco de trabajo que estandarice los pasos a seguir a lo largo del desarrollo de un estudio de capacidad de vía, conformando así un estándar de trabajo para los diversos actores interesados del Sector Ferroviario en México. Para llevar a cabo esto, es primordial que la metodología propuesta en esta tesis permita evaluar la capacidad ferroviaria de manera sencilla y rápida, enfocando así el interés de análisis más profundo solamente en aquellos estudios donde se requiera mayor detalle. Por ejemplo, en los distintos tramos ferroviarios con potencial de integrar una operación mixta.

Además, como caso particular en esta investigación se desarrolla la evaluación del Tren Ligero de Xalapa, con la cual se ejemplifica la metodología propuesta a la vez que se determina la capacidad de esta línea y se crean propuestas para una correcta operación ferroviaria. Es importante aclarar que la metodología no es exclusivamente aplicable en nuestro país, si no para cualquier parte del mundo que cuente con condiciones similares a las aquí expuestas.

Una vez obtenida la capacidad ferroviaria se generan propuestas para su optimización en la línea a corto, mediano o largo plazo. La aplicación de mejoras se hará de acuerdo con la siguiente jerarquía presentada por Villareal, en el 2020, del cual propone:

1. Mejoras a la operación: se refieren a ajustes de los horarios de salida de los trenes. Es la mejora que primero se debe evaluar ya que se trata de la más sencilla y rápida además de ser la más económica.
2. Mejoras a la infraestructura: las mejoras a la infraestructura se refieren a mejorar el sistema de señalización y control existente, ajustes de cruces a nivel (p. ej. semaforización o instalación de plumas), implementación de tramos con vía doble, etc. De todos estos cambios, probablemente el último elemento resulte ser el más costoso, pero es preferible sobre el de modificar el material rodante, debido a que la mayoría de las vías en México se encuentran concesionadas y para que la operación mixta sea una realidad, el acuerdo con el concesionario es interferir lo menos posible con sus actividades.
3. Mejoras al material rodante: es la mejora menos factible, ya que los trenes de carga no pueden ser modificados, resultando no deseable el cambiar esta característica del sistema, a menos que sean agotadas en su totalidad las dos anteriores y con previo acuerdo con el operador de carga.

La metodología que se propone desarrollar para el cálculo de capacidad se presenta primero descrito en los siguientes pasos y esquematizada por medio de un diagrama de flujo (Figura 28), para su fácil comprensión y como herramienta para estudios posteriores como programación de la metodología.:

- 1) Obtención de la información necesaria para ejecutar las ecuaciones para el cálculo de capacidad ferroviaria, como lo son:
 - a. Infraestructura. (Longitud de línea, línea doble o sencilla)

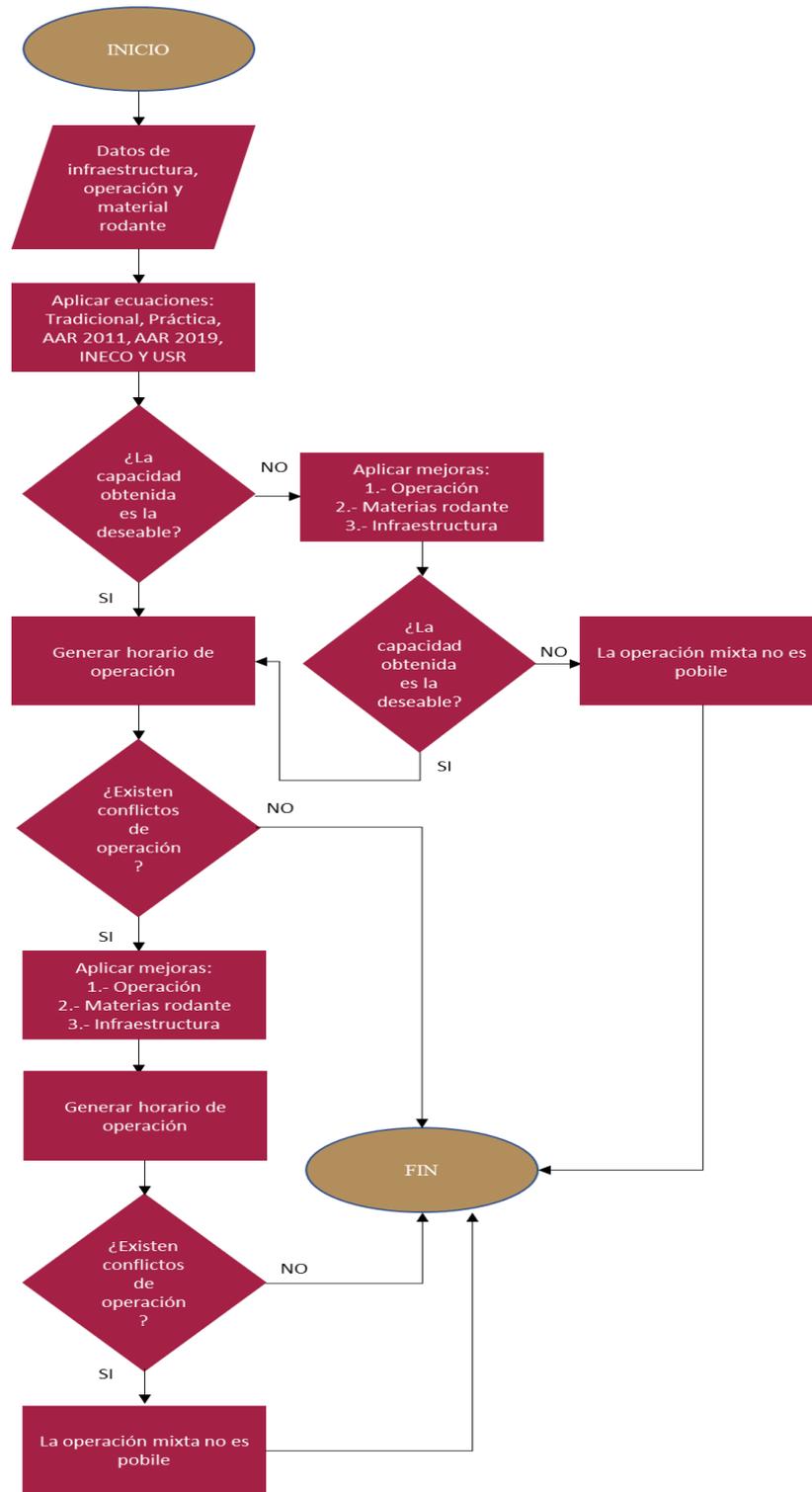
- b. Material rodante. (Velocidad de operación para el tren de pasajeros y carga)
 - c. Operación. (Estaciones, sistema de control, rutas del tren, distancia entre cantones, tiempo de parada en cada estación)
- 2) Aplicar las ecuaciones, comparar entre ellas y generar datos preliminares para una discusión posterior.
 - 3) Evaluar si la capacidad obtenida es la deseable. La capacidad menor obtenida entre todos los cantones determina la capacidad del sistema.
 - 4) Generar un horario de operación, comprobando que no existan conflictos y retrasos.

Si existen conflictos ajusta:

- I. Mejoras a la operación: ajustes horarios de salida de los trenes o tiempo de espera en las estaciones.
- II. Mejoras en la infraestructura: integración de laderos o estaciones que permita el cruzamiento de trenes de manera dinámica, vías dobles, ajuste de cruces a nivel, etc.
- III. Mejoras al material rodante que consiste: cambio de largo de trenes de carga, cambio de velocidades de operación o de unidades.

Figura 28

Diagrama de flujo para el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos.



Fuente: elaboración propia.

Si la capacidad obtenida aun con la aplicación de estas mejoras no se resuelve de ninguna manera, se concluye que la operación mixta en ese tramo ferroviario no es posible.

Durante el punto tres (3) donde se obtiene la capacidad del sistema de acuerdo con la menor de las capacidades obtenidas en los diferentes tramos, si este valor resultara ser menor al de la demanda deseada y se aplican las mejoras (operación, infraestructura y material rodante) y se sigue sin lograr llegar a un valor mayor o igual a la capacidad deseada, significa que la operación mixta no es posible bajo esta metodología y se deberá analizar a detalle utilizando herramientas de simulación la posibilidad de uso mixto. Esto último, condicionado a la importancia del proyecto, caso contrario, no resultaría recomendable seguir con estudios de mayor detalle.

La metodología presentada en esta investigación además da pautas a la creación de estudios de pre-inversión que sirven para determinar la viabilidad económica de un proyecto ferroviario generando tomas de decisiones respaldadas por un análisis matemático.

III.1.1 Limitaciones y consideraciones previas

Como ya se mencionó la información fundamental para el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos es:

- a) Datos de infraestructura
- b) Datos del material rodante
- c) Datos de la operación

Datos de infraestructura:

La información mínima para poder aplicar las ecuaciones analíticas aquí propuestas se presentan a manera de resumen en la Tabla 4.

Tabla 4

Datos e información mínima necesaria de la infraestructura para aplicación del cálculo de capacidad ferroviaria

Datos	Descripción	Unidad
Longitud	Longitud total de estudio.	km
Vía única o doble.	Es necesario conocer si la vía es única o doble para aplicación de diferentes factores en las fórmulas.	No aplica

Fuente: elaboración propia.

Para tener conclusiones o consideraciones más robustas y cercanas a la realidad es indispensable considerar si la línea a estudiar cuenta con cruces a nivel, derecho de vía existente para futuras ampliaciones y mejoras de la capacidad del sistema mediante la construcción de nueva infraestructura ferroviaria.

Datos de material rodante

Se entiende como material rodante al tipo de locomotora que circula en las vías tanto de ferrocarriles de pasajeros (coches) como de carga (carga). Los métodos analíticos, gracias a que son la forma más sencilla para obtención de capacidades, demandan una menor cantidad de datos para su aplicación en comparación con métodos de simulación, por lo que del material rodante lo único que requieren son las velocidades de operación del sistema de pasajeros y de carga (Tabla 5).

Tabla 5

Datos e información mínima necesaria del material rodante para la aplicación del cálculo de capacidad ferroviaria

Datos	Descripción	Unidad
Velocidad de tren de pasajeros	Velocidad a la que operará el sistema de manera habitual	(km/h o m/s)
Velocidad de carga	Velocidad a la que operará el sistema de manera habitual	(km/h o m/s)

Operación:

Se requiere saber la cantidad de trenes de carga que circulan de manera habitual en la línea, así como el horario y la dirección de operación, esto, para evaluar la capacidad utilizada y calcular la capacidad disponible en la red que pueda ser aprovechada por los trenes de pasajeros mediante la creación de nuevos horarios.

Para la operación de trenes de pasajeros se debe contar con la distancia de los cantones, así como los tiempos de parada de los trenes para ascenso y descenso de pasajeros y si existen laderos en la vía o no y donde se ubican.

Tabla 6

Datos e información mínima necesaria de la operación ferroviaria para el cálculo de capacidad de vía ferroviaria

Datos	Unidad
Cantones: distancia entre los trenes de uso exclusivo por un solo tren. En métodos analíticos es un valor fijo	(km)
Tipo de sistema de control	Sin sistema de control/ Con sistema de control
Tiempo de parada en cada estación	seg
Si existen estaciones o laderos para permitir el cruzamiento entre trenes, ubicación y distancia.	km

III.1.2 Ecuaciones propuestas

Los métodos analíticos propuestos para el cálculo de capacidad ferroviaria son:

III.2.1.1 Método tradicional analítico.

Este método fue presentado por Togno F. en su libro: “Ferrocarriles. México: Representaciones y servicios de Ingeniería” el cual fue citado por Márquez en el 2011 en su estudio de implementación de un tren de pasajeros “Bogotá-Balencito”.

Por su parte la capacidad práctica puede ser calculada a partir de esta expresión multiplicando el resultado por un coeficiente práctico que se encuentra en un rango de 0.6 a 0.75. El factor para utilizar depende de la operación y condiciones actuales con las que cuenta el sistema.

$$C = \frac{2,880}{s + b + E} \quad 1$$

Donde:

s: tiempo de recorrido subiendo, es el tiempo de recorrido que le toma al tren realizar su trayecto en una dirección (min).

b: tiempo de recorrido bajando, es el tiempo de recorrido que le toma al tren realizar su trayecto en la dirección contraria a “s” (min)

E: tiempo de protección de separación de trenes. representa el tiempo que necesita tener un tren de separación con otro además del tiempo que requieren los trenes para detenerse en las estaciones, entrar y salir. (min)

III.1.2.2 Método AAR 2011

Esta ecuación fue propuesta por la American Associations of Railroads (AAR) la cual es una asociación privada creada por un grupo comercial de la industria de los ferrocarriles en Estados Unidos de América que representa a los ferrocarriles y compañías ferroviarias, esta sociedad invierte en investigación que favorezca la operación ferroviaria.

$$C = \frac{a * T * f}{Mb} \quad 2$$

Donde:

a: corresponde a una constante que toma el valor de 2 para tramos de línea única, es un factor de corrección “a” considerando si la línea se trata de vía única o doble.

T: representa el periodo de análisis, representa el tiempo que la vía estará en uso (min)

F: factor de corrección que toma el valor de 0.9 en líneas ferroviarias con bloqueo automático y 0.8 en otras condiciones de operación.

Mb: módulo máximo neto que representa la suma de tiempo sin parada de un tren determinado, más el tiempo necesario para realizar las operaciones de entrada y salida de las estaciones. Mb puede entenderse como “s+b+E” del método tradicional.

III.1.2.3 Método AAR 2019

Esta ecuación resulta una combinación de la versión American Association of American Railroads 2011 y la de INECO, ya que considera igual un factor de 1,440 y un tiempo no disponible de la vía. Además, esta expresión considera un coeficiente práctico, por lo que la capacidad obtenida es la capacidad práctica.

$$C = \frac{(Horas\ al\ dia(24h) - Tm)}{(t_{ida} + t_{vuelta} + 2\theta)} * Ef^3$$

Donde:

Tm: tiempo de indisponibilidad por mantenimiento

Ef: Coeficiente de eficiencia empírico

t_i: tiempo de viaje de ida en el tramo en min

t_e: tiempo de viaje de vuelta en el tramo en min

Θ: tiempo medio de separación de trenes(establecimiento de ruta) por tren

III.1.2.4- Método INECO

El método propuesto por la empresa estatal “Ingeniería y Economía del Transporte (INECO), dependiente del Ministerios de Fomento español, es una empresa dedicada a la

consultoría de ingeniería civil en el área de transporte, de más de 50 años de antigüedad que busca generar movilidad sostenible y segura en todos los sistemas que ha diseñado en los cinco continentes. Con esta ecuación se considera 1,440 para línea única y 2,880 para línea doble.

$$C = \frac{2,880 - T_c}{F * T_m + T_s} \quad 4$$

Donde:

T_c : tiempo no disponible de la vía

T_m : tiempo de marcha total del tren estándar

F: factor de mayoración

III.1.2.5 Método USRA

La metodología USR es desarrollada por la United States Railroad Administration (USRA) y la Consolidated Rail Corporation (Conrail) antigua empresa de ferrocarriles de carga propiedad del gobierno de los Estados Unidos de América. Esta metodología fue

basada de acuerdo con la experiencia de las empresas ferroviarias en Estados Unidos proponiendo valores y supuestos

5

$$C = \left(\frac{D}{T}\right) * F$$

Donde:

C: cantidad de trenes que pueden circular en un tramo dado por día y sentido. (capacidad de tráfico) expresada en (tren/día-sentido)

D: disponibilidad de uso de la vía férrea. Está asociada a las horas efectivas al día en que la vía se encuentra disponible para la circulación de trenes. Se debe considerar las horas destinadas al mantenimiento, trenes de carga o algún otro tiempo de interrupción del servicio. (h/tren-sentido)

T: tiempo requerido para maniobras entre desvíos de cruzamiento. Es el tiempo utilizado por el tren para el desplazamiento en un tramo de vía según disponga o no de desvíos de cruzamiento. Expresados en (h/tren)

F: factor de eficiencia del sistema de movilización utilizado. “F” asume que un 100% del sistema si el sistema de movilización es automático o con control de tráfico centralizado

(1.00), disminuyendo en cierto porcentaje según el sistema disminuya la cantidad de trenes movilizados.

Con esta ecuación se obtiene la capacidad ferroviaria teórica, expresada en la siguiente ecuación:

La ecuación para determinar “T”, tiempo requerido para maniobras de cruzamiento cuando en el tramo ferroviario no hay desvíos de cruzamiento es:

$$T = \frac{L}{Vp} \quad 7$$

Donde:

L: longitud del tramo analizado.

Vp: Velocidad promedio de circulación. Será la velocidad de diseño del tramo ferroviario analizado multiplicado por 0.67 (km/h).

Cuando en el tramo analizar si existen desvíos o cruzamiento la ecuación para determinar “T” es:

$$T = \left(\frac{L}{V_p (d + 1)} \right) + tc \quad 8$$

Donde:

L: longitud del tramo analizando. (km)

Vp: Velocidad promedio de circulación. Será la velocidad de diseño del tramo ferroviario analizado multiplicado por 0.67 (km/h).

d: cantidad de desvíos o estaciones de cruzamiento.

Tc: tiempo de maniobras entre desvíos de cruzamiento. (h)

El tiempo de viaje dependerá directamente de la longitud, de la cantidad de desvíos de cruzamiento, velocidad promedio de circulación y el tiempo de maniobras para los desvíos de cruzamiento del tramo analizado.

En este capítulo se mostró de manera general la metodología propuesta para el cálculo de capacidad ferroviaria que se utilizará en este proyecto de investigación, en el cual con la aplicación de estas ecuaciones, se debe generar resultados para poder comparar entre ellos y otorgar un valor de la capacidad único, después valorar si la capacidad obtenida satisface la demanda del sistema de pasajeros y aplicar mejoras tanto para el aumento de capacidad o

para obtención de un sistema más seguro y eficiente por medio de la generación de un horario de operación, recordando que es importante verificar que en el horario no existan conflictos y colisiones entre trenes.

En el siguiente capítulo se ejemplificará la metodología aquí propuesta con el caso particular de Xalapa, para despejar cualquier duda que pudiera existir para el lector, así como la evaluación de un proyecto real que quiere integrarse en México.

Capítulo IV.-Desarrollo de la metodología en el caso particular de Xalapa

IV.1 Obtención de la información

La información necesaria para el desarrollo del cálculo de capacidad ferroviaria del Tren Ligero de Xalapa fue proporcionada por diferentes instituciones: los datos del servicio actual de trenes de carga fueron otorgados por la propia concesionaria prestadora del servicio en Xalapa: Kansas City Southern de México a través de la ARTF, otorgando frecuencias de paso de los trenes de carga, largo de los trenes, velocidad de operación, así como los días con mayor tráfico ferroviario, indispensable para este análisis (será discutidos en el capítulo 4.1.3) los datos corresponden al año 2018 y 2019 por lo que describen perfectamente el contexto actual del estudio.

Por otra parte, los datos particulares sobre los trenes de pasajeros fueron obtenidos en el documento: Perfil del Tren Ligero de Xalapa realizado el 2019 por la ARTF, en un trabajo conjunto con el Gobierno del Estado de Veracruz, Secretaría de Infraestructura y Obra Pública (SIOP) del Gobierno del Estado de Veracruz, Gobierno Municipal de Xalapa, Instituto de Ecología (INECOL), Universidad Veracruzana (UV), Secretaría de Desarrollo Urbano y Dirección General de Desarrollo Ferroviario y Multimodal de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT). Documento que describe la ubicación de las estaciones propuestas para el proyecto, así como su geografía, velocidad permitida, además de todas las aportaciones sociales, ecológicas y económicas que se traería a la ciudad por la implementación de este proyecto, por lo que se le recomienda al lector consultar este documento si desea conocer más afondo la propuesta.

IV.1.1 Infraestructura

Los datos necesarios para la aplicación de las ecuaciones respecto a la infraestructura son: la longitud de la línea y si es que la infraestructura cuenta con vía única o vía doble tal como se muestra en la Tabla 7 (Elaboración propia basados en el Perfil Del Tren Ligero de Xalapa, 2019). En el caso de Xalapa a pesar de que algunos tramos son de vía doble, esta no se encuentra en uso, por lo que se considerará que solo se habilitará vía única en una primera etapa, ya que el objetivo es implementar el proyecto de manera segura pero factible desde un punto de vista económico.

Tabla 7

Datos de la operación de acuerdo con el Perfil del Tren Ligero de Xalapa

Datos	Descripción	Unidad
Longitud	Longitud total de estudio.	17.9 Km
Vía única o doble.	Xalapa: vía única.	

IV.1.2 Material rodante

La información requerida para la aplicación de los métodos analíticos sobre el material rodante se muestra en la Tabla 8. Se necesita únicamente las velocidades de operación del tren de carga y tren de pasajeros (ambos tomados del documento “Perfil del Tren Ligero de Xalapa”), en el cual expone la velocidad permitida para el proyecto del tren de carga y pasajeros en el tramo ferroviario de Xalapa.

Tabla 8

Datos del material rodante de acuerdo con el Perfil del Tren Ligero de Xalapa

Tipo de material rodante	Velocidad (km/h)
Tren de pasajeros.	80 km/h
Tren de carga.	25 km/h

IV.1.3 Operación

Para la operación se requiere un mayor número de datos y sobre todo un análisis previo de la información, para obtener conclusiones y dar propuestas fiables.

La operación del Tren Ligero de Xalapa para el análisis de capacidad es de uso mixto, ya que la vía se compartirá con el servicio de trenes de carga con la mínima afectación a la concesionaria KCSM con el objetivo de optimizar la infraestructura existente.

El horario de operación del tren de pasajeros es propuesto de 6:00 a 22:00 hrs, esto con base en el estudio de Demanda realizado en el 2017 y que se presenta en el Perfil del Tren Ligero de Xalapa, en donde se obtuvieron las horas de máxima demanda y las horas valle, necesarias para saber la cantidad de trenes que se necesitan para proveer el servicio.

A pesar de que inicialmente se propusieron 14 estaciones en el Perfil del proyecto, para el análisis de capacidad, se tomaron en cuenta únicamente 12. La estación número seis “Antigua estación del Tren” y el número catorce” Patio de maniobras”, no fueron consideradas para el análisis debido a que la primera no fue aprobada para utilizarse como estación de pasajeros, ya que de acuerdo al estudio de movilidad realizado en Xalapa en el 2019 no representa un lugar de atracción de viajes a pesar de que se esperaba rescatar el edificio con la integración de una estación dado que el edificio tiene un alto valor histórico por su arquitectura particular además que la estación es el actual patio de maniobras de KCSM, por lo que por acuerdo de autoridades y concesionario continuará de uso exclusivo para trenes de carga. Mientras tanto la estación “Patio de Maniobras” será utilizado únicamente cuando los trenes finalicen su horario de operaciones. Se contempla que en cada recorrido se reinicie la ruta en “Velódromo” y el tren no entre hasta el patio de maniobras salvo en situaciones extraordinarias, cada que el tren se reincorpore, el maquinista simplemente pasará de la cabina final a la inicial para conducir el tren sin necesidad de dar toda la vuelta. (como ocurre

actualmente en el metro de la Ciudad de México o el Tren Suburbano de la Zona Metropolitana del Valle de México, o en el Tren Suburbano, solo por mencionar algunos).

La distribución de las estaciones, nombres y distancia entre ellas se encuentran explicadas en la Tabla 9. (Elaboración propia basados en el Perfil Del Tren Ligero de Xalapa, 2019).

Tabla 9

Distancia de las estaciones propuestas del Tren Ligero de Xalapa

Número	Estación	Kilómetro	Distancia entre estación (km)
1	Terminal Intermodal Banderilla	329.3	0
2	Banderilla-La calera	332.2	2.9
3	Salvador Díaz Mirón	333.4	1.2
4	Avenida México	335.3	1.9
5	División del Norte	336.7	1.4
6	Antigua Estación del tren (sin considerar)	338	1.3
7	Jardines de Xalapa	338.9	0.9
8	Estación de intercambio multimodal Plaza Cristal	339.9	1
9	Estación de intercambio modal regional CAXA	341.1	1.2
10	Murillo Vidal	342	0.9
11	Enrique Rébsamen	342.6	0.6
12	USBI-UV	343.2	0.6
13	Terminal Intermodal Velódromo	344.1	0.9
14	Patio de maniobras (sin considerar)	347.2	3.1
Total, del recorrido			17.9

Se entiende como “estación” al lugar donde se permite que exista un cruzamiento de trenes, adelantamiento, cruces o cambio de dirección en la red permitiendo el paso de un tren y otro. Es la vía conectada por ambos extremos a la vía principal, en el cual se evita el encuentro y posible colisión entre trenes (UIC, 2013). Para el caso particular de Xalapa en el documento del Perfil del proyecto propone que exista estación en cada una de las paradas propuestas permitiendo el ascenso y descenso de pasajeros además de ser el lugar para

rebasar de manera segura un tren a otro, de manera inicial se propone la existencia de doce estaciones, después del análisis de capacidad se determinará si esta propuesta inicial continúa o se mejora.

Actualmente no existe ningún sistema de control operando la línea, por lo que para realizar el estudio se consideró como vía no señalizada.

El tren de pasajeros del Tren Ligero de Xalapa se planea circule en una línea única en ambas direcciones, lo que quiere decir que los trenes circularán de la estación Terminal Banderilla-Terminal Velódromo y de Terminal Velódromo – Terminal Banderilla.

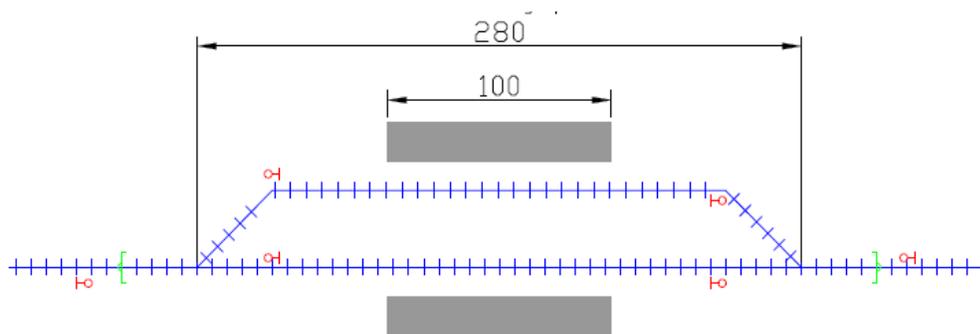
Para las distancias entre los bloques se tomó la propuesta realizada por Mauricio Villarreal en su tesis: *Assessment of Mixed Traffic Operation in Underutilized Rail Lines in Mexico: The Case of Study of the Mixed Traffic Tram-Train Located in Xalapa, Veracruz, México*, en el cual presenta un estudio de capacidad de la misma línea férrea por métodos de simulación, explica que es fundamental conocer la distancia de los cantones en los que podrá ocupar exclusivamente un solo tren a la vez, esta distancia conocida como cantón o bloque, fue calculada y propuesta inicialmente en 600 metros, pero debido a que las estaciones no se

encuentran equidistantes, se propusieron entre 300-600 metros. Los cantones como se muestra en la Figura 29 se propusieron tomando en cuenta el largo de trenes del Tren de pasajeros y la distancia de frenado necesaria, así como algunos factores de seguridad. Para practicidad y comparación de este estudio con el de Villareal, se aplicó la misma consideración.

El diseño de las estaciones (Ver Figura 29) con sus respectivos laderos igualmente fue tomado de la propuesta de Villarreal, en el cual se explica que la distancia mínima necesaria para las estaciones es de 280 metros, permitiendo al tren ingresar a una velocidad de 40 km/h y lograr descender toda la velocidad hasta llegar a cero, así como ser capaz de mantener un ascenso y descenso seguro.

Figura 29

Propuesta de estaciones para trenes de pasajeros

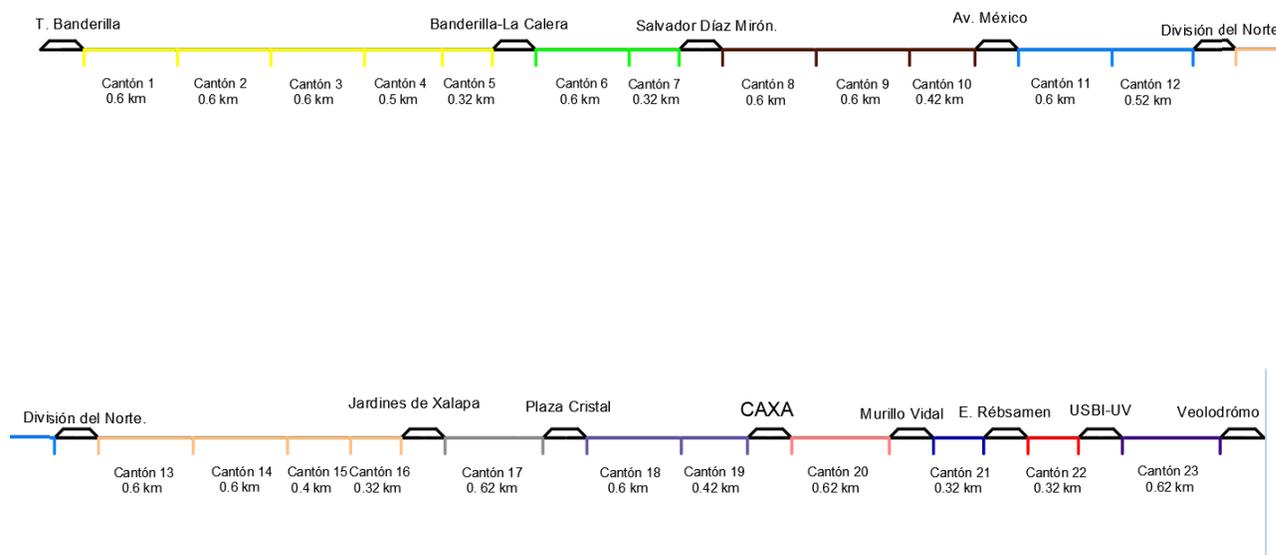


Fuente: Villarreal 2020.

En la Figura 30 se muestra esquemáticamente la posición de los cantones, largo y nomenclatura para poder realizar la aplicación de las ecuaciones entre cada cantón, en el caso de las estaciones, están delimitadas por su propia distancia.

Figura 30

Esquema de la división de cantones del Tren Ligero de Xalapa



Fuente: elaboración propia basados en Villareal, 2020.

Los trenes de carga circulan en ambas direcciones y en horarios no predecibles, ya que se guían bajo demanda. Actualmente sobre el corredor circulan en promedio cuatro trenes diarios, que corresponden a la capacidad utilizada del sistema.

Los datos de operación de trenes de carga no son utilizados directamente en las ecuaciones de los métodos analíticos, pero resultan prioritarias para crear conclusiones que describan de manera detallada la realidad, así como estrategias confiables, para integrar horarios de operación seguros, estos datos se proporcionan para conocer mejor el estado actual de la red que se pretende operar y para considerar las acciones necesarias para una circulación segura. (Ver Capítulo 5)

Tabla 10

Datos de la operación de acuerdo con el Perfil del Tren Ligero de Xalapa

Cantones: distancia entre los trenes de uso exclusivo por un solo tren. En métodos analíticos es un valor fijo	(0.6- 0.3) (km)
Tipo de sistema de control	Ninguno.
Tiempo de parada en cada estación	60 segundos
Si existencias estaciones o laderos para permitir el cruzamiento entre trenes, ubicación y distancia.	Si, en cada estación. (km)

IV.2 Aplicación de las ecuaciones propuestas

La aplicación de las ecuaciones se hará paso a paso para el Cantón 1, con este desarrollo se pretende ser totalmente claro sobre las consideraciones del cálculo por cualquier duda

que pudiera existir con la aplicación de las expresiones, para el resto de los cantones debido a que el proceso es repetitivo, se presentan los resultados en la Tabla 11, página 111.

IV.2.1 Método tradicional

$$C = \frac{2,880}{s + b + E} \quad 1$$

Donde:

El tiempo recorrido (s) se calculó a partir de la ecuación:

$$\text{tiempo de recorrido subiendo (s)} = \frac{\text{distancia del cantón}}{\text{velocidad de operación del tren}}$$

Sustitución:

$$\text{tiempo de recorrido subiendo (s)} = \frac{0.6 \text{ km}}{80 \text{ km/h}}$$

$$\text{tiempo de recorrido subiendo (s)} = 0.0075 \text{ horas} = 0.45 \text{ min}$$

$$\text{Tiempo de recorrido subiendo (s)} = \text{tiempo de recorrido bajando (b)}$$

E: tiempo de protección de separación de trenes se compone de la suma de:

Tiempo de separación de trenes: 3 min, propuesto ya que es un valor que se presenta en varios sistemas de transporte, como el metro de la Ciudad de México.

Tiempo para detenerse en cada estación: 1 min. (propuesto)

Tiempo para entrar y salir de la estación: 1 min. (propuesto)

Por lo tanto, E: 5min.

Sustituyendo:

$$C = \frac{2,880}{0.45 \text{ min} + 0.45 \text{ min} + 5 \text{ min}} = 488 \frac{\text{trenes}}{\text{día}}$$

Para el cálculo de capacidad práctica se calculará con el coeficiente práctico de 0.75 por lo que la capacidad práctica es:

$$C = 0.75 * 488 \left(\frac{\text{trenes}}{\text{día}} \right) = 366 \frac{\text{trenes}}{\text{día}}$$

IV.2.2 Método AAR 2011

$$C = \frac{a * T * f}{Mb}$$

Donde:

$a = 2$ para tramos de línea única.

T : la capacidad se analizará por el periodo de un día, 1440 min.

F : como no cuenta con bloqueo automático, en otras condiciones de operación 0.8.

Mb : puede entenderse como “ $s+b+E$ ”.

$$Mb = s + b + E = 0.45 \text{ min} + 0.45 \text{ min} + 5 \text{ min} = 5.9 \text{ min}$$

Sustituyendo:

$$C = \frac{2 * 1,440 * 0.8}{5.9} = 390 \frac{\text{trenes}}{\text{día}}$$

IV.2.3 Método AAR 2019

$$C = \frac{(Horas\ al\ dia(24h) - Tm)}{(t_{ida} + t_{vuelta} + 2\theta)} * Ef \quad 4$$

Debido a que la ecuación ya está afectada por el factor práctico de 0.85, la capacidad obtenida con esta ecuación es capacidad práctica.

Donde:

Tm: se proponen 2 horas diarias de mantenimiento para la red. (120 minutos)

Ef: Se sugiere 0.85

t_i= s, por lo tanto, es 0.45 min

t_e: tiempo de viaje de vuelta en el tramo en min. (0.45 minutos)

Θ: tiempo medio de licenciamiento (establecimiento de ruta) por tren, se sugiere de 3 minutos.

Sustituyendo:

$$C = \frac{(1,440 - 120)}{(0.45 + 0.45 + 2(3))} * 0.85 = 162 \frac{trenes}{día}$$

IV.2.4 Método INECO

$$C = \frac{2,880 - T_c}{F * T_m + T_s}$$

Donde:

T_c : tiempo no disponible de la vía. (120 min)

T_m : tiempo de marcha total del tren estándar. (0.45 min)

T_s : 5min.

F: factor de mayoración. (1.2)

Sustituyendo:

$$C = \frac{1,440 - 120}{1.2 * 0.45 + 5} = 238 \frac{\text{trenes}}{\text{dia}}$$

IV.2.5 Método USR

$$C = \left(\frac{D}{T}\right) * F$$

Donde:

D: 16 horas de operación, ya que la operación se llevará a cabo de 6:00 a 22:00 (h/tren-sentido)

F: 0.5

T: tiempo requerido para maniobras entre desvíos de cruzamiento. Es el tiempo utilizado por el tren para el desplazamiento en un tramo de vía según disponga o no de desvíos de cruzamiento. Expresados en (h/tren)

Cuando en el tramo ferroviario no hay desvíos de cruzamiento “T” se calcula como:

$$T = \frac{L}{V_p} \quad 7$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{0.6}{53.6} = 0.011$$

Donde:

L: longitud del tramo analizado. (0.6 kilómetros)

V_p: 0.67* 80= 53.6 km/h.

Sustituyendo:

$$C = \left(\frac{16}{0.011} \right) * 0.5 = 714 \frac{\text{trenes}}{\text{día}}$$

Para obtener la capacidad práctica se afecta por el factor de 0.75.

$$C = 0.6 * \left(714 \frac{\text{trenes}}{\text{día}} \right) = 535 \frac{\text{trenes}}{\text{día}}$$

IV.3 Presentación de resultados

A continuación, se presenta una tabla resumen en donde se muestran los resultados obtenidos de capacidad ferroviaria en cada cantón por los diferentes métodos analíticos. (Ver Tabla 11). En aquellas ecuaciones que al aplicarse se obtiene capacidades teóricas se utilizó un factor de 0.75 para su homologación a capacidades prácticas, y así poder comparar entre ellas. Se tomó el valor del 75% de la capacidad teórica, ya que es una línea de bajo tráfico ferroviario.

Tabla 11

Capacidades ferroviarias obtenidas en la línea de Xalapa por diferentes métodos

analíticos.

<i>Nombre cantón</i>	<i>Distancia</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Tradicional</i>	<i>Practica 0.75</i>	<i>AAR 2011</i>	<i>AAR 2019</i>	<i>INECO</i>
		$t = d/v$	$C = \frac{2,880}{s + b + E}$	$0.75 \left(\frac{2,880}{s + b + E} \right)$	$\frac{a * T * f}{Mb}$	$0.85 \left(\frac{1,440 - t_m}{t_{ida} + t_{vuelta} + 2\theta} \right)$	$\frac{1,440 - T_c}{F * T_m + T_s}$
	(km)						
<i>T.Banderilla</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 1</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 2</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 3</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 4</i>	0.5	0.375	500	375	400	166	242
<i>Cantón 5</i>	0.32	0.24	525	393	420	173	249
<i>Banderilla-La calera</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 6</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 7</i>	0.32	0.24	525	393	420	173	249
<i>Salvador</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Díaz Mirón</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 8</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 9</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 10</i>	0.42	0.315	511	383	409	169	245
<i>Av. México</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 11</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 12</i>	0.52	0.39	498	373	398	165	241
<i>División del Norte</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 13</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 14</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Cantón 15</i>	0.4	0.3	514	385	411	170	246
<i>Cantón 16</i>	0.32	0.24	525	393	420	173	249
<i>Jardines de Xalapa</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 17</i>	0.62	0.465	485	363	388	161	237
<i>Plaza Cristal</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 18</i>	0.6	0.45	488	366	390	162	238
<i>Nombre cantón</i>	<i>Distancia</i>	<i>Tiempo (min)</i>	<i>Tradicional</i>	<i>Practica 0.75</i>	<i>AAR 2011</i>	<i>AAR 2019</i>	<i>INECO</i>

<i>Nombre del cantón</i>	Distancia	Tiempo (min)	Tradicional	Practica 0.75	AAR 2011	AAR 2019	INECO
<i>Cantón 19</i>	0.42	0.315	511	383	409	169	245
<i>CAXA</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 20</i>	0.62	0.465	485	363	388	161	237
<i>Murillo Vidal</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 21</i>	0.32	0.24	525	393	420	173	249
<i>Rébsamen</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 22</i>	0.32	0.24	525	393	420	173	249
<i>USBI-UV</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
<i>Cantón 23</i>	0.62	0.465	485	363	388	161	237
<i>Velódromo</i>	0.28	0.21	531	398	425	174	251
			Capacidad del sistema(trenes/día)	363	388	161	237

La Tabla 12 presenta los resultados de capacidad práctica obtenidos por el método USR, correspondiente a cada cantón.

Tabla 12

Capacidad ferroviaria obtenida para el tren Ligero de Xalapa por el método. USR.

Nombre cantón	Distancia (km)	¿Hay ladero?	D	Longitud del tramo (km)	Velocidad de diseño	No. De desvíos	F sistema de movilización	T	Capacidad	Capacidad practica 0.75
T.Banderilla	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 1	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 2	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 3	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 4	0.5	NO	16	0.5	80	0	0.5	0.009	857	642
Cantón 5	0.32	NO	16	0.32	80	0	0.5	0.006	1340	1005
Salvador Díaz Mirón	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 6	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 7	0.32	NO	16	0.32	80	0	0.5	0.006	1340	1005
Av. México	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 8	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 9	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 10	0.42	NO	16	0.42	80	0	0.5	0.008	1020	765
División del Norte	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 11	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 12	0.52	NO	16	0.52	80	0	0.5	0.010	824	618
Jardines de Xalapa	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 13	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 14	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 15	0.4	NO	16	0.4	80	0	0.5	0.007	1072	804
Cantón 16	0.32	NO	16	0.32	80	0	0.5	0.006	1340	1005
Plaza Cristal	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 17	0.62	NO	16	0.62	80	0	0.5	0.012	691	518
CAXA	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 18	0.6	NO	16	0.6	80	0	0.5	0.011	714	535
Cantón 19	0.42	NO	16	0.42	80	0	0.5	0.008	1020	765
Murillo Vidal	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 20	0.62	NO	16	0.62	80	0	0.5	0.012	691	518
Rébsamen	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 21	0.32	NO	16	0.32	80	0	0.5	0.006	1340	1005
USBI-UV	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134
Cantón 22	0.32	NO	16	0.32	80	0	0.5	0.006	1340	1005
Cantón 23	0.62	NO	16	0.62	80	0	0.5	0.012	691	518
Velódromo	0.28	SI	16	0.28	80	1	0.5	0.045	179	134

Fuente: elaboración propia.

IV.4.- Comparativa entre características iniciales de diseño operativo y resultados analíticos

El primer paso es determinar la capacidad del sistema identificando el cantón o cantones críticos en cada ecuación, esto se obtiene detectando el cantón con el menor número de trenes que pueden circular en él.

En el caso del Método Tradicional, AAR 2011, AAR 2019 e INECO los cantones críticos son el cantón 17, 20 y 23 (véase tabla 12), siendo estos los más largos del sistema, cada uno con 620 metros de longitud. Cantones más largos disminuyen la capacidad y cantones más cortos aumentan la capacidad. Por medio de señalización se da la orden a los demás trenes del sistema que un cantón se encuentra ocupado y avisa por medio de una señal de entrada cuando este se desocupa y da oportunidad de circular a otro tren distinto. Mientras más cortos son las distancias de cantones estos se liberan más rápido dando paso a nuevos trenes, mientras más largos más tardan en liberarse y obstruyen la entrada a otros trenes. Para vías únicas con circulación en ambas direcciones la capacidad se ve altamente influenciada por la existencia y posición en la que se encuentren los laderos, ya que en esos puntos es donde se hará el rebase o cruzamiento de trenes, por lo que la coordinación y señalización es prioridad para un sistema seguro y eficiente.

Con el método USR (ver Tabla 12) los cantones críticos se encuentran en las estaciones, la capacidad ferroviaria permite un máximo de 134 trenes / día. En este método

la capacidad ferroviaria disminuye cuando el cantón cuenta con desvío, ya que considera el tiempo de entrada, salida y ocupación del desvío, disminuyendo notoriamente la capacidad.

La Tabla 13 muestra la frecuencia de servicio que tendrán los trenes de pasajeros de acuerdo con cada ecuación. La cual se explica a continuación:

- Segunda columna: se muestran la capacidad del sistema obtenido con los diferentes métodos analíticos (número máximo de trenes que pueden circular en el tramo ferroviario).
- Tercera columna: muestra la capacidad disponible, esta se obtiene con la diferencia de la capacidad del sistema respecto a la capacidad utilizada (4 trenes de carga diarios, de acuerdo con los datos proporcionados por la ARTF).
- Cuarta columna: muestra el número de trenes que pueden circular cada hora, es el cociente de la capacidad disponible, entre las 16 horas de operación.
- Quinta columna: presenta la frecuencia en minutos con la que puede circular un tren en la red por sentido.

Tabla 13

Tiempo en minutos que podrá circular cada tren por sentido en la vía de Xalapa de acuerdo con cada ecuación.

Tipos de capacidad.	Practica 0.75	AAR 2011	AAR 2019	INECO	USR 0.75
Capacidad práctica	363	388	161	237	134
Capacidad usada (número de trenes de carga que circulan diariamente)	4	4	4	4	4
Capacidad disponible (Capacidad práctica- capacidad utilizada)	359	384	157	233	130
$\frac{\text{Trenes/hora}}{\text{Capacidad disponible}} \times 16 \text{ horas de servicio}$	22	24	9	14	8
Tren/hora/sentido	11	12	4	7	4
Tren por minuto	5	5	15	8	15

Primero, se evalúa el planteamiento inicial de operación descrito en el Perfil de estudio (AAR, 2019), este plantea que durante hora pico y hora valle la frecuencia de servicio sea de 10 minutos y 20 minutos, respectivamente.

Con el Método Tradicional se obtuvo una frecuencia de 5 minutos, lo que implica que con este método la capacidad obtenida del sistema es mayor a la deseada. Con el Método AAR 2011 e INECO la frecuencia obtenida es cada tren es de 5 minutos y 8 respectivamente, por lo que de igual manera no representa problema alguno en la programación de trenes de pasajeros por lo que no hay inconvenientes el programar el servicio de trenes en hora pico ni valle.

En el Método AAR 2019 y USR la frecuencia es de 15 minutos, siendo una diferencia significativa respecto a las anteriores, pero aun aceptable para la operación, ya que, aunque se despacharía un tren cada 15 minutos y se encuentra fuera del rango deseable que se requiere en el Perfil del proyecto para hora pico (1 tren cada 10 minutos), la operación o implementación de un sistema de control, o algún tramo en vía doble o simplemente coordinación del sistema de despacho de trenes, generaría que se alcanzara la capacidad deseable.

Capítulo V.- Análisis de resultados y discusión

Al contrastar los resultados obtenidos en esta investigación con el estudio realizado en el 2020 por métodos de simulación para el mismo tramo ferroviario, los métodos más precisos son USRA y AAR 2019, ambas ecuaciones obtienen una frecuencia de despacho de trenes de 15 minutos, mismo tiempo obtenido con el programa Railsys, esta capacidad fue evaluada respecto a las condiciones actuales de la vía (Villarreal, 2020).

Por consideración del autor la ecuación recomendada para el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos para el caso particular de Xalapa y tramos ferroviarios con características similares al Tren Ligero de Xalapa es el método USRA, por los motivos que se enlistan a continuación:

1. La ecuación se adapta de manera precisa a casos de línea única, gracias a que toma en cuenta un mayor número de parámetros que afectan la capacidad ferroviaria, haciendo más estricto el cálculo y con esto obteniendo valores similares a métodos más complejos como los métodos de simulación.
2. Es la única que ecuación de las que se aplicaron en este estudio que considera si el cantón cuenta con ladero o no, si es el caso de que el cantón cuenta con ladero se calcula el tiempo de entrada, permanencia y salida, parámetro que resulta vital en el análisis de capacidad para tramos de vía única, ya que estos tiempos generan retrasos que alteran la capacidad ferroviaria de manera significativa.
3. El método USRA se encuentra desarrollado paso a paso en la literatura, con ejemplos gráficos, volviéndose la ecuación clara para el lector y permitiendo su replicación a otros tramos ferroviarios sin confusiones por alguna variable.

Acorde al método USRA la capacidad práctica del sistema del Tren Ligero de Xalapa corresponde a 134 trenes/día, cuya longitud del cantón crítico es 280 metros y se encuentra ubicado en las estaciones, lo que quiere decir que la capacidad ferroviaria se ve regida en los cantones que cuenta con laderos, debido al tiempo de entrada, permanencia y salida de los trenes. El segundo valor más desfavorable de capacidad se obtiene en los cantones de mayor longitud, 620 metros, ósea en los cantones 17, 20 y 22 con un valor de capacidad de 691 trenes/día, a pesar de que se trata del segundo valor más desfavorable, es 5 veces menor la capacidad ferroviaria cuando existe ladero que cuando no hay. Con los resultados obtenidos por el método se destaca que las obras de desvío rigen en el valor de la capacidad ferroviaria sobre el de longitud de los cantones en el caso de vías sencillas, por lo que sería un error el descartarlo en el análisis, como ocurre con las otras ecuaciones.

En el caso de los otros métodos considerados en el análisis dentro de esta investigación, se obtuvieron la capacidad del sistema en los cantones más largos, ya que entre mayor longitud tienen los bloques menor capacidad ferroviaria. Si analizamos esta premisa tiene lógica ya que cantones más grandes llevan a mayor tiempo de recorrido y más tarda en liberarse un cantón para que otro tren pueda ocuparlo, aunque los cantones más largos son más seguros, también obstaculizan el sistema por lo que uno de los estudios de capacidad futura podría ser determinar el largo ideal de los cantones seguros, pero con capacidades eficientes.

Con el fin de obtener la capacidad disponible se realizó un análisis de capacidad utilizada en la vía de Xalapa, en la cual transitan trenes con mercancía de la Ciudad de México al Puerto de Veracruz, principalmente. Las locomotoras actualmente circulan en el tramo

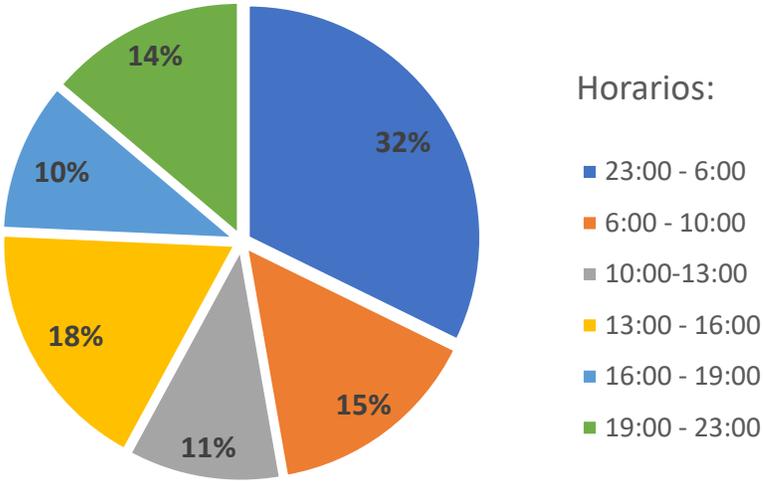
ferroviario sin ningún tipo de señalización, por lo que con la llegada de los trenes de pasajeros será necesario instalar un sistema de control adecuado que garantice la seguridad y convivencia de los trenes. En el año 2019 se realizó una ampliación al Puerto de Veracruz para recibir mayor volumen de carga, pero a pesar de ello, el tráfico ferroviario que transita diariamente sigue siendo de intensidad baja, por lo que no representa un obstáculo para la operación mixta. De acuerdo con los datos proporcionados por KCSM actualmente operan en promedio 3 trenes diarios de carga, por lo que con la ampliación consideramos una circulación en el futuro de 4 trenes diarios tal como se propone el perfil del Tren Ligero de Xalapa. Además, existen movimientos pequeños con movimiento de locomotoras, acomodamientos internos, etc, pero la mayoría de estos ocurren en el patio de maniobras de la “Antigua estación del tren”, el tren de pasajeros únicamente transita, pero no se detiene en esta estación, adicional a esto en esta estación existen varias vías por lo que si en el caso más desfavorable se detuviera existen suficientes vías en esta estación como para abastecer servicio de carga sin que existan conflictos.

En promedio un tercio de los movimientos de trenes de carga ocurren en horario nocturno (23:00 a 5:00) tal como se observa en la Figura 31, lo que significa que no interfieren con la operación de pasajeros, propuesta de 6:00 a 22:00 horas. Otro 33% de trenes circulan en horarios de máxima demanda, por lo que se debe ajustar a que estos movimientos de trenes de carga se lleven a cabo horas de baja demanda, lo que quiere decir que en horarios de máxima demanda la red será de tránsito exclusivo para trenes de pasajeros, esto para garantizar seguridad en la operación y disminuir los retrasos. Aunque esta premisa deberá ser revisada una vez se cuente con un sistema de señalización robusto que permita el uso mixto

de la vía. El porcentaje de trenes restantes circulan en horarios de baja demanda, por lo que podrán seguir funcionando de esta manera sin perjudicar al sistema.

Figura 31

Porcentaje de movimiento de los trenes de carga de acuerdo con los horarios de operación, de acuerdo con el registro de KCSM 2018-2019



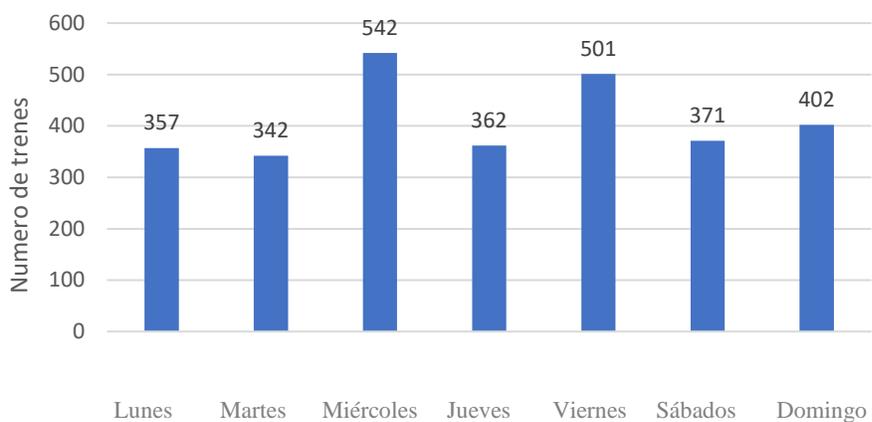
Fuente: Villarreal,2020.

A pesar de que circulan 3 trenes diarios, se consideraron para el análisis de capacidad 4, para tener margen de error en caso de algún evento extraordinario. Los días que transitaron un mayor número de trenes del 2018-2019 fueron los miércoles y viernes, tal como se observa en la Figura 32. Es importante considerar esta información, para la programación de trenes de pasajeros ya que si este comportamiento persiste, en estos días se presentará más congestión y posibles retrasos por lo que resulta importante identificar las ventanas de tiempo disponibles para que se genere la menor interferencia con el servicio de pasajeros y se afecte

mínimamente al servicio de carga, sin olvidar que los trenes de carga no pueden ser programados con antelación, si no que dependen de la demanda del momento, así que una correcta operación y coordinación serán fundamental para la seguridad del sistema tener un aviso con antelación al centro de control para la toma de medidas adecuadas.

Figura 32

Número de trenes que circularon en el año 2018-2019 respecto al día de la semana



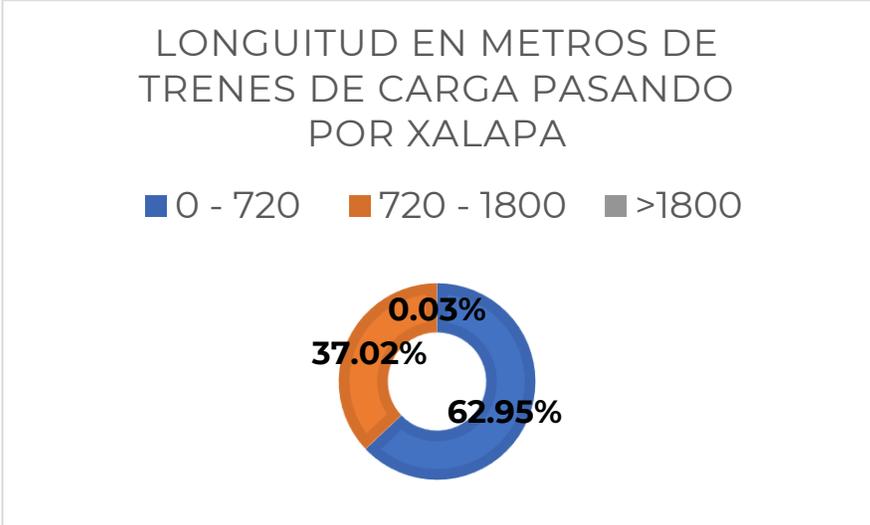
Fuente: Villarreal 2020, Basado en registro de eventos de KCSM 2018-2019.

La Figura 33 se muestra el porcentaje del largo de trenes de carga que circula actualmente en la vía de Xalapa, la cual varía entre 200 a 800 m por tren (cortos) y de 1500 a 1800 m (largos). La operación que se presenta en los trenes de carga responde a la demanda que existe en el momento, no se presenta con antelación, por lo que en ciertas ocasiones existe una sobrecarga y en otros momentos muchos “tiempos muertos” lo que ocasiona ineficiencias en el punto de vista técnico. (ARTF, 2019). Por lo que se debe considerar la programación

de trenes de carga para poder realizar operación mixta con pasajeros de manera segura, ya que será la única manera que los dos sistemas trabajen eficientemente. Es importante conocer el largo de trenes que suelen circular, ya que esto permite calcular los tiempos de recorrido cuando un tren de carga es largo o corto y ver cómo influye con la operación, sobre todo para análisis en software, es por ello por lo que se presenta esta información para dar pauta a los estudios más detallados.

Figura 33

Longitud de los trenes de carga que operan en el tramo de Xalapa



Fuente: Registro de eventos de KCSM 2018-2019 obtenidos por ARTF.

Se propone que para la operación de trenes de carga, el tren entre a la red y realice su recorrido como de costumbre haciendo únicamente parada en “La antigua estación del tren” o simplemente recorriendo el tramo de inicio a fin sin ninguna parada intermedia, mientras los trenes de pasajeros esperan en las “estaciones” de manera segura, esta labor requiere de trabajo de coordinación y sobre todo de una buena señalización y control de la operación,

donde se bloquee el cantón automáticamente para evitar cualquier falla humana. Estas sugerencias dependerán de su aplicación del operador del servicio de carga y el presupuesto con el que se cuente, siempre velándose por la seguridad. Adicional si el tráfico de operación aumenta en el futuro podría considerarse el integrar un ladero para trenes de carga, en donde el tren de carga pueda parar antes de entrar a la zona de tráfico mixto, dando una solución óptima de mediano y largo plazo en la red.

Con la selección de la metodología USRA que obtiene el valor de capacidad que describe mejor las características ferroviarias de Xalapa se realizaron las siguientes propuestas de horarios, estos horarios se elaboraron manualmente en el programa Excel, donde se puede observar gráficamente las estaciones donde se pueden presentar posibles conflictos.

Las consideraciones tomadas en cuenta fueron las siguientes:

1. Los tiempos de recorrido de una estación a otra se calcularon previamente, en todos los casos el rango de tiempo es entre 1 y 2 minutos.
2. El tiempo que se consideró para entrada, salida y permanencia de los trenes fue de 3 minutos, ya considerando posibles retrasos.
3. Se contemplo que en horas pico los trenes circularan cada 15 minutos y en hora valle cada 20 minutos.

En la figura 34 y 35 se muestran las propuestas de horarios del tren de pasajeros de 6:00 a 7:30 am, con el fin de visualizar e identificar gráficamente los puntos donde existan posibles conflictos y con esto proponer mejoras al sistema.

Con la frecuencia obtenida en el método USRA, se realizó el horario que se observa en la figura 34 en donde se grafica el despechado de un tren cada 15 minutos lo que quiere decir que es en horario de máxima demanda, en el horario se observa que se presentan conflictos en varias estaciones, ya que los trenes que circulan en direcciones opuestas arriban al mismo tiempo a la estación, generando que existan posibles retrasos o en el peor de los casos una colisión, por lo que es importante tenerlo identificado estos puntos para programar mejoras a la operación como esperar un tren en algún ladero o diferente tiempo se despache la ruta. La programación del despacho entre trenes debe ser tal que se asegure que los trenes siempre se crucen en las estaciones, permitiendo que uno circule en el ladero y otro en la vía principal, evitando cualquier problema para que no sea necesario maniobrar en una zona de vía única, por lo que la operación, señalización y correcta coordinación permitirá que el sistema sea exitoso y seguro. Es importante enfatizar que si algún tren se retrasa o algún tren intenta circular en la red sin previo aviso (de manera aleatoria) el horario se vería afectado y el sistema sufriría de ineficiencia.

En la segunda propuesta de horario (Figura 35) se muestra como al modificar el tiempo de permanencia en algunas estaciones de 3 a 2 minutos, se soluciona el conflicto en la operación, mientras en otras con que un tren pase por la vía principal y otro por la vía de desvío se puede igualmente solucionar el conflicto, por lo que es indispensable una correcta coordinación.

Figura 35

Horario de 6:00 a 7:30 del Tren Ligero de Xalapa, con frecuencia de 15 min, aplicando

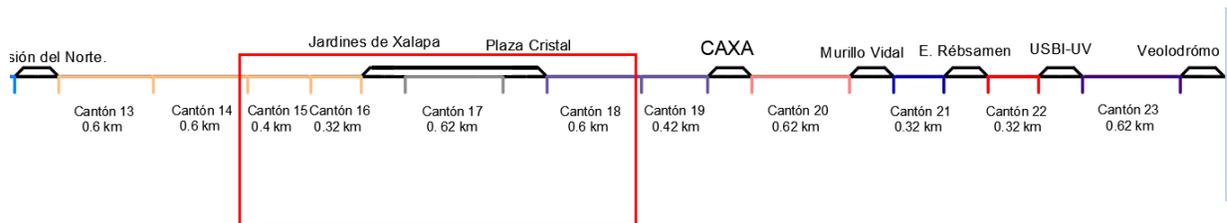
propuestas de operación

	T.Banderilla derilla-La Cal	rador Diaz Mi	Av. México	visión del Noidines de Xal	Plaza Cristal	CAXA	Murillo Vidal	Rebsamen	USBI-UV	Velódromo
06:00	06:00									06:00
06:01										
06:02										
06:03	06:03									06:03
06:04									06:04	
06:05		06:05								
06:06										
06:07									06:07	
06:08		06:08						06:08		
06:09			06:09							
06:10										
06:11								06:11		
06:12			06:12				06:12			
06:13										
06:14				06:14						
06:15								06:15		
06:16						06:16				
06:17				06:17						
06:18					06:18					
06:19						06:19				
06:20	06:20					06:20				06:20
06:21					06:21					
06:22										
06:23	06:23				06:23	06:23				06:23
06:24									06:24	
06:25		06:25								
06:26										
06:27									06:27	
06:28		06:28		06:28		06:27				
06:29			06:29					06:28		
06:30	06:30				06:30					06:30
06:31				06:31		06:31		06:31		
06:32			06:32				06:32			
06:33	06:33			06:33		06:34			06:34	06:33
06:34				06:34						
06:35		06:35				06:34	06:35		06:34	
06:36				06:36		06:36				
06:37			06:37						06:37	
06:38		06:38			06:38		06:38	06:38		
06:39			06:39			06:39			06:39	
06:40			06:40							
06:41				06:41		06:40			06:41	
06:42		06:42	06:42			06:40		06:42	06:42	
06:43					06:43	06:43			06:43	
06:44			06:44							
06:45	06:45	06:45					06:45			06:45
06:46	06:46					06:46			06:46	
06:47			06:47			06:47				06:47
06:48	06:48			06:48						06:48
06:49	06:49					06:49	06:49		06:49	
06:50						06:50				06:50
06:51				06:51			06:51			
06:52						06:51			06:52	
06:53		06:53		06:53		06:53		06:53		
06:54			06:54				06:54			
06:55			06:54					06:55		
06:56		06:56	06:56			06:56		06:56		
06:57			06:57			06:57				
06:58				06:58		06:57		06:58		
06:59			06:59			06:59		06:59		
07:00	07:00		07:00			07:00	07:00			07:00
07:01			07:01	07:01						
07:02		07:02			07:02			07:02		
07:03	07:03			07:03					07:03	07:03
07:04		07:04				07:04			07:04	
07:05		07:05		07:05			07:05			
07:06	07:06			07:06					07:06	

En la Figura 34 y 35 se muestra como en la estación “Jardines de Xalapa” siempre se interceptan los trenes (se encuentran destacados con un cuadro negro), se sugiere que el ladero se extienda en las estaciones de Jardines de Xalapa y Plaza Cristal para una mayor holgura tal como se muestra en la figura 36, para que la operación sea segura y las maniobras menores, además que al ser la estación media podría ser el punto para rebase de trenes que permita evitar la creación de cuellos de botella en la red y por lo tanto reducir su eficiencia operativa. Además, por conocimiento del autor se sabe que geográficamente en esta estación se cuenta con espacio suficiente para implementar el doble ladero, por lo que no representaría problemas su integración desde el punto de vista de espacio.

Figura 36

Propuesta de solución de ladero extendido en las estaciones Jardines de Xalapa con Plaza Cristal



Fuente: Elaboración propia.

La frecuencia de los viajes de los trenes de pasajeros debe satisfacer la demanda de viajes actual en la ciudad de Xalapa, pero lamentablemente no existe ningún estudio exclusivo para este proyecto. El estudio más reciente corresponde al 2017 donde se refleja que diariamente en promedio se realizan 138,000 viajes en Xalapa y un gran porcentaje de estos coinciden con las estaciones propuestas del tren (ARTF, 2019), por lo que se espera sea un gran

transporte de atracción de viajes. Por lo tanto la propuesta que se evalúa en este estudio es que la frecuencia de viajes del Tren Ligero se dé un tren cada 10 minutos en hora de máxima demanda y un tren cada 20 minutos en hora valle.

Con los resultados obtenidos en las condiciones actuales con las que cuenta la línea esta propuesta inicial no se cumple, ya que la frecuencia de paso en hora pico es de 15 minutos en vez de 10 minutos, en horas valle no representaría ningún problema, ya que si puede realizar el despacho de los trenes cada 20 minutos sin inconvenientes. En el caso de horas punta debido a que varía únicamente en 5 minutos, se sugiere hacer pruebas en la programación de trenes para disminuir las frecuencias de paso, ya que un buen sistema de señalización y control aumentan la capacidad del sistema y los trenes circularían sin problemas en la red. Otra solución sería el de acoplar trenes para hacerlos dobles y con esto se transporte a un mayor número de pasajeros con la misma frecuencia de paso.

Las propuestas o la generación de horarios son infinitas, ya que las variaciones de un horario a otro pueden ser mínima, desde 1 minuto de despacho después, o mayor tiempo de espera en las estaciones.

Los aumentos de velocidad en la operación no se recomiendan para una primera etapa debido a que las mejoras que se deben llevar a cabo para alcanzar velocidades más altas en la red de Xalapa serían muy costosas, ya que requerirían de vías en condiciones particulares para alcanzar velocidades mayores como son: cambios geométricos (radios de curvatura) y pendientes mínimas (menores al 2%), así como eliminación de cruce a nivel que en el caso de Xalapa sería inviable desde el punto de vista económico en una primera propuesta, por lo

que las otras dos soluciones antes mencionadas resultan más sensatas. Es importante aclarar que una ventaja clara con la que cuenta el proyecto del Tren Ligero de Xalapa es que cuenta con su derecho de vía prácticamente intacto y que la calidad de la vía se puede mejorar la calidad de la infraestructura sin inconvenientes geométricos.

Además, que debido a que la vía se trata de una línea única con operación de carga con proyección a ser más intensiva a la actual genera que la operación sea propensa a generar conflictos, por lo que es importante rectificar y coordinar los trabajos de manera segura. Estos conflictos no necesariamente se tratan de colisiones, en realidad se refiere a retrasos en la red que pueden ser bastante significativos para los trenes de pasajeros, ya que en la operación de pasajeros uno de los parámetros más importantes a considerar en un sistema de transporte es la puntualidad.

Capítulo VI. - Conclusiones y panorama futuro

El cálculo de capacidad ferroviaria es un proceso fundamental para la integración segura de sistemas ferroviarios, que, a pesar de su importancia, en México no se realizan. Los proyectos ferroviarios han sido integrados pasando por alto estos cálculos dando como resultado sistemas mal planeados, costoso e ineficientes. En México y América Latina los estudios para el cálculo de capacidad ferroviaria se encuentran limitados a unos cuantos y los pocos que existen carecen de claridad; omiten pasos y/o consideraciones en la aplicación de las ecuaciones que hacen que al lector le sea difícil comprender la metodología y más cuando se trata de una persona con poca experiencia en el ramo. Uno de los objetivos que se quiso lograr con esta investigación es que cualquier lector especializado o no en el tema, pueda comprender la metodología aquí propuesta y posteriormente realizar evaluaciones de capacidad ferroviaria de manera rápida, certera y fiable. Se expuso una metodología simple y clara además de que se ejemplificó paso a paso con el caso particular del Tren Ligero de Xalapa, para despejar cualquier duda que aun pudiera existir.

El cálculo de capacidad ferroviaria es indispensable para integrar sistemas ferroviarios seguros, debido a que este valor permite determinar cuántos trenes pueden circular en las vías de manera segura, además de determinar si un trazo ferroviario puede transitar el número de trenes deseados para satisfacer la demanda de movilidad. También la capacidad ferroviaria permite planificar estrategias para cumplir con estas necesidades. Con el valor de capacidad ferroviaria además se puede calcular el número de unidades que deben adquirirse para satisfacer el servicio y posteriormente realizar análisis económicos.

El objetivo principal de este estudio fue proponer una metodología para el cálculo de capacidad ferroviaria que fuera posible replicar en distintos tramos ferroviarios en México,

con potencial de operación mixta, y con ello obtener resultados previos fácilmente para continuar con estudios económicos que permitan realizar propuestas de pre-inversión necesarios para negociar con los gobiernos el financiamiento e integración de trenes en el país. Con los estudios de pre-inversión se ofrecen propuestas de los proyectos ferroviarios al Gobierno y/o inversionistas privados para obtener recursos y poder ejecutarlos. Este estudio tiene como objetivo la obtención rápida de capacidad ferroviaria para que se puedan realizar estos estudios con facilidad y certeza, para poder obtener financiamiento para su ejecución y con esto facilitar la introducción de trenes de pasajeros en distintas partes del país.

La metodología que se sugiere es lo suficientemente robusta y con el nivel de complejidad tal, que permite replicarse en otros tramos ferroviarios con características similares al de Xalapa. En México no existen metodologías para integrar sistemas ferroviarios, cuando se concesionó la red ferroviaria, se abandonó completamente al sector, por lo que se dejó de formar expertos en nuestro país, hoy en día esto representa una gran problemática, debido a que se cuenta con pocos profesionales, regulación deficiente y no existe respaldo bibliográfico actualizado en español sobre metodologías para integrar un tren de pasajeros. Con esta investigación se pretenden integrar los primeros pasos necesario para que el sector crezca, se debe aprovechar el interés renovado del Estado por integrar sistemas de transporte masivo de trenes de pasajeros, pero estos deben de estar fundamentados en estudios técnicos, sociales y económicos que respalden a los proyectos para que se ejecuten correctamente y con esto se apueste por este modo de transporte.

Para el caso particular de Xalapa, la capacidad del sistema resultó de 134 trenes/día, con una frecuencia de paso de 15 minutos en hora de máxima demanda y 20 minutos hora

valle. El tiempo de recorrido del tren varía de 47-50 minutos, requiriendo 8 trenes para la operación, se sugiere además contar con una unidad adicional de reserva por mantenimiento o algún problema técnico que puede presentar algún tren, por lo tanto, se necesitan de 9 unidades para dar un servicio adecuadamente. Además, es importante recalcar que la frecuencia de 10 minutos es posible, pero con aplicación de mejoras al sistema en operación e implementación de señalización, así como mejoras a la infraestructura como lo son específicamente los laderos, para que los encuentros sean más eficientes de resolver y que deben ser estudiadas a mayor profundidad para encontrar las características óptimas en futuras investigaciones.

Se debe optimizar este modelo para obtener una base más sólida para el futuro aumento de tránsito de trenes de carga debido a la ampliación del puerto de Veracruz, estas mejoras pueden ser: sistemas de control y señalización más avanzados, dando oportunidad a horarios más flexibles y mayor control de la seguridad y puntualidad del servicio de trenes de pasajeros. Debido a que los trenes de carga actualmente son manejados sin anticipación y sobre la demanda de carga que existe en el momento desde el puerto, una de las soluciones que podría darse es saber el tiempo que tarda el tren de carga en recorrer del puerto de Veracruz hacia Xalapa y con esta antelación de horas realizar una programación para que el tren transite en horas valle para poder cubrir cualquier eventualidad, operar esas irregularidades de la manera más controlada posible, por lo que esto representa otra línea de investigación interesante y complementaria a esta tesis.

Es importante enfatizar que el cálculo de capacidad ferroviaria por métodos analíticos es recomendable en etapas de pre-inversión, ya que los métodos analíticos tratan de

ecuaciones propuestas por diferentes entidades ferroviarias que proponen expresiones para el cálculo de capacidad basada en la experiencia, son ecuaciones totalmente empíricas, lo que hace que la persona que los utiliza debe ser cuidadoso y meticuloso con los resultados obtenidos, si bien genera un panorama confiable para una primera etapa del proyecto, el autor recomienda que en las etapas posteriores, sobre todo para la generación de horarios se evalúe por métodos de simulación por medio de algún software especializado, ya que será la única manera de garantizar la seguridad operacional del sistema.

Regresando al caso particular del Tren Ligero de Xalapa, los resultados obtenidos en esta tesis por medio de métodos analíticos son muy cercanos a los obtenidos por Mauricio Villarreal en su tesis evaluado por simulación con el programa Railsys, lo que comprueba la fiabilidad de los resultados, pero en la generación de horarios con el programa se pueden generar propuestas de mejoras más fiables, ya que la simulación te muestra los conflictos y permite generar horarios infinitos rápidamente, además que por las variables que se requiere para modelar describe de manera más cercana la realidad, tiene un grado de confiabilidad mayor a los métodos analíticos. Los métodos analíticos se recomiendan únicamente para etapas tempranas de planeación.

El costo de inversión inicial en los proyectos ferroviarios es la causante principal de que no se apuesten por trenes de pasajeros en México y América Latina, pero gracias a la evaluación de capacidad ferroviaria del Tren Ligero de Xalapa en donde se demostró que la operación mixta es posible, la propuesta de introducir trenes de pasajeros en vías existente es una realidad, esto con el fin de reducir el costo de inversión inicial y aprovechar las vías subutilizadas generando que los trenes de pasajeros se vuelvan competentes económicamente

hablando con los otros modos de transporte, por lo que no es comparable el costo de mejoras a una red ferroviaria a construcción de vía completamente nueva. Se espera que con esta propuesta los gobiernos vuelvan a apostar por este transporte que ha demostrado ser más eficiente y sustentable que el resto. Se debe empezar a cambiar la idea de que los proyectos ferroviarios son proyectos que requieren de una inversión inicial enorme e implementar la idea de que se trata de proyectos de costo medio a moderado. Es un error común en nuestro país pensar en trenes lujosos, con grandes edificios en cada estación que representan varios millones de pesos en inversión, por lo que se debe empezar en apostar por sistemas ferroviarios en los que se invierta en lo esencial, que los edificios de las estaciones sirvan para prestar servicio, sin lujos innecesarios, que los trenes cumplan con la función de la cual fueron integrados: mover pasajeros de manera eficiente, en un transporte limpio, puntual y seguro para sus usuarios, no se debe olvidar que el principal objetivo de los trenes de pasajeros es mejorar la calidad de la movilidad y mejorar el nivel de vida de las personas.

Un factor que debe ser importante para la elección de un sistema de transporte de pasajeros es el costo de vida del proyecto, esta evaluación es una excelente línea de investigación para futuras tesis. Con esto se puede comprobar que los trenes de pasajeros son más rentables a través del tiempo a comparación de otros sistemas, por ejemplo, haciendo una comparativa con el Metrobús, proyectos que inicialmente requieren menor inversión inicial que el tren pero que resultan más costosos por pasajeros/ kilómetro.

Los trenes de pasajeros en México cuentan con una segunda desventaja que ha frenado su crecimiento y es la falta de estudios previos que se realizan antes de su construcción. No existe como tal una metodología o regulación ferroviaria en nuestro país

que dicte los estudios previos necesarios para evaluar su fiabilidad técnica y económica. Un gran número de los proyectos ferroviarios en México se ha realizado por convencías y voluntades políticas, pasando por alto estudios económicos, de demanda o de capacidad ferroviaria que nos permiten determinar fiabilidad técnica y económica y que se vea reflejado en proyectos mal planeados, ejecutados con errores que se modifican en campo resultando aún más costosos que si se detectan en gabinete, además que al realizarse sin estudios de demanda o de capacidad ferroviaria hace que se sobredimensionen las vías, material rodante, operación, sistemas de control, etc. con el fin de “asegurar” proveer el servicio, pasando por alto que esos sobre dimensionamientos se ve traducidos a costos excesivos. Un claro ejemplo es el adquirir más trenes de los necesarios para el sistema, este cálculo se logra a partir de estudios técnicos de demanda y capacidad, al omitir estos estudios se adquieren más unidades que las necesarias, la compra de un tren más en el sistema es un gasto que representa alrededor de 1.3 millones de euros, evidenciando que la planeación es sumamente importante, y que ahorra grandes sumas de dinero.

Si un proyecto ferroviario se planea correctamente desde el escritorio los costos serán menores que si se realizan cambios en campo, debido a que los costos aumentan exponencialmente. La planeación y estudios previos es parte fundamental para desarrollar un proyecto ferroviario de éxito. En México uno de los problemas principales es la falta de regulación, leyes y normas ferroviarias que garanticen proyectos bien ejecutados de principio a fin.

Otra línea de investigación que resulta interesante es realizar un estudio sobre los costos que conlleva la operación y mantenimiento de un ferrocarril de pasajeros como el de

Xalapa, debido a que es otro factor que eleva costos significativamente, por la exigencia de seguridad y puntualidad que requiere este sistema ferroviario para ser óptimo, por lo que resulta interesante estudiar cual sería la combinación más eficiente para optimizar costos. Este estudio complementaría con esta investigación para tener un panorama completo de características mínimas que se requieren para que un sistema ferroviario de pasajeros sea rentable y seguro. Se debe tener un panorama y metodología completa para no sobredimensionar y por lo tanto no desperdiciar recursos.

Es necesario como se está realizando en el sexenio del presidente Andrés Manuel López Obrador (2018-2024) que las autoridades apuesten por trenes de pasajeros para transportar usuarios masivamente y con esto solucionar el problema de movilidad a futuro, con proyectos verdaderamente sustentables en todos los aspectos y no únicamente en trenes de tipo turístico. Este estudio es el primer paso para incentivar la inversión en los trenes de pasajeros en México, abriendo brecha para que nuevos proyectos se integren en pro de mejorar la movilidad del país y con esto detonar la economía y mejorar la calidad de vida.

Referencias

Administradora de la vía corta Tijuana-Tecate (2015). *Servicio Público Ferroviario de pasajeros en la modalidad turístico*. Recuperado el 13 de abril del 2022 de:
<http://www.fcbc.com.mx/>

Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M. A., Tormos, P., & Lova, A. (2008, Septiembre). *An assessment of railway capacity*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation. Universidad Técnica de Valencia.
<https://www.researchgate.net/publication/222673865>

Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (2021). Dirección de Estadística Ferroviaria. Anuario Estadístico Ferroviario 2020.
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/675317/Anuario Estadístico 2020_VF2_compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/675317/Anuario_Estadistico_2020_VF2_compressed.pdf)

Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario. (2019). *Sistema Ferroviario Mexicano*.
<https://www.gob.mx/artf/articulos/infraestructura-ferroviaria-191183?idiom=es>

Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, Gobierno del Estado de Veracruz y Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2019). *Perfil del proyecto “Tren Ligero Metropolitano de la Región Capital”*. Informe Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario.

Albrecht, T., Brunger, O., Caimi, G., Corman, F., Dahlhaus, E., D’Ariano, A., Goverde, R., Hansen, I., Huisman, D., Kecman, P., Kroon, L., Maróti, G., Martín, U., Madeossi,

G.,Nash, C., Nieben, N., Pacciarelli, D.,Pachl, J.,Radtke,....Yuan, J. (2014). *Railway Timetabling & Operations*. DW Media Group publication.

Cadena, C., & Silva, C. (2016). *Determinación de la capacidad ferroviaria del corredor Facatativá-Bogotá con sus características físicas actuales* [Tesis de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional- Universidad Católica de Colombia.

Camacho Alcocer, D. (2011). *Promoting a Light Rail Train-with-Trail on an Underutilized Urban Freight Rail Corridor in Xalapa, México*. [Tesis de Maestría, Universitat Stuttgart]. Repositorio Institucional- Universitat Stuttgart.

Chepe Express.(2019). *Tren turístico en México Chepe Express: una ruta increíble*. Recuperado el 14 de diciembre del 2019 de: <https://chepe.mx/>

Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (2009). *Tranvitrén y tren-tranvía. Hacia una mejora del aprovechamiento de las infraestructuras ferroviarias*. Recuperado el 02 de abril del 2019 de: [file:///C:/Users/dfm17/Desktop/TESIS/Material%20de%20consulta/Novales_Margarita_Bugarin_MiguelR_Tranvitren_Tren-Tranvia_Cuaderno_CICCP%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/dfm17/Desktop/TESIS/Material%20de%20consulta/Novales_Margarita_Bugarin_MiguelR_Tranvitren_Tren-Tranvia_Cuaderno_CICCP%20(1).pdf)

Díaz Gonzáles, D. R., Gonzales Maldonado, A. G. (2012) *Análisis y perspectivas del ferrocarril de pasajeros en México* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México] Repositorio Institucional-Universidad Nacional Autónoma de México.

Dirección General de Estudios, Estadística y Registro Ferroviario Mexicano, Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (2019) *Capacidad de vía*.
<https://www.gob.mx/artf/documentos/quinto-informa-anual-de-actividades-de-la-artf>

Escalón E. (14 de noviembre de 2005). El automóvil de confort personal a problema colectivo. *Universo*. <https://www.uv.mx/universo/201/central/central.htm>.

Ferrocarriles Suburbanos (01 de octubre de 2019) *Presentación del suburbano*.
http://fsuburbanos.com/pdf/la_empresa/presentacion_suburbano.pdf

Ferrocarriles Suburbanos. (2022). *Operación, costo del viaje*. Recuperado el día 13 de abril del 2022 de: http://fsuburbanos.com/secciones/operacion/costo_viaje.php

Gobierno del Estado de Puebla. (14 de diciembre de 2019) *Tren turístico Puebla-Cholula*.
https://6552b557-a731-46ef-b67a-33480aa25a37.usrfiles.com/ugd/6552b5_75aef4b73e244fb494e9658f58fd4234.pdf

Gobierno del Estado de Veracruz. (22 de noviembre de 2019) *Tren Ligero de Xalapa contará con una inversión conjunta de 3 mil mdp: Gobernador*.
<http://www.veracruz.gob.mx/2019/10/22/tren-ligero-de-xalapa-contara-con-inversion-conjunta-de-3-mil-mdp-gobernador/>.

International Union of Railways. (2013). *UIC CODE 406 Capacity*. UIC CODE.

Kuri A. (2019). *La historia del tendido de los ramales ferroviarios en las cercanías de la ciudad de Xalapa: obra pública y transformación del espacio, 1876-1922* [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. Repositorio Institucional- Universidad Veracruzana.

López Gutiérrez, M.A. (2018). *Comparativa entre dos sistemas de transporte urbano de capacidad media: autobuses de tránsito rápido y tren ligero. Caso de estudio: Línea 1 del Metrobús y Tren Ligero de la Ciudad de México.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional- Universidad Nacional Autónoma de México.

Márquez Díaz, L G., Vega Báez, L.A. y Poveda D'Otero, J.C. (2011). Evaluación de la capacidad ferroviaria del corredor Bogotá-Belencito. *Revista de Ingeniería.* (#35), pp. 12-19. <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n35/n35a03.pdf>

Márquez Martínez, T. (2013). *Muy breve historia de los trenes de pasajeros.* Repositorio Material de la Facultad de Ingeniería UNAM. file:///C:/Users/dfm17/Desktop/TESIS/Material%20de%20consulta/5M_Tren%20de%20Pasajeros.pdf

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones Programa de Desarrollo Logístico (2020) *Metodología para el cálculo de capacidad ferroviaria teórica de segmento de vía.* https://www.observatoriologistico.cl/publicaciones/metodologias/Metodolog%C3%ADa%20de%20Capacidad%20Ferroviaria_v1.0_publicado.pdf

Molina, I. (20 de agosto 2019). Hay más taxis en Xalapa que en Guadalajara: Hipólito. *Diario de Xalapa*. <https://www.diariodexalapa.com.mx/local/hay-mas-taxis-en-xalapa-que-en-guadalajara-hipolito-4065233.html>

Quintero Gonzales, Rodrigo. J. (2017). Beneficios ambientales, sociales y económicos del tranvía y tren ligero: Valoración de las políticas públicas de Colombia. *Revista Transporte y Territorio*. (17), 203-228. [fecha de consulta 10 de marzo de 2022]
<https://www.redalyc.org/pdf/3330/333053372010.pdf>

Reséndiz Méndez, M. U. (2019). *Ferrocarril: una alternativa superior al transporte carretero*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México].
Repositorio Institucional- Universidad Nacional Autónoma de México.

Rotoli, F., Navajas Cawood, E. y Soria, A. (2016). *Capacity assessment of railway infrastructure: Tools, methodologies and policy relevance in the EU context*. European Union.

Sánchez, C. (17 de febrero de 2020). *Citar Informes, Reportes – Referencia Bibliográfica*. Normas APA (7ma edición). Recuperado el 02 de febrero del 2022 de <https://normas-apa.org/referencias/citar-informes-reportes/>

Secretaria de Comunicaciones y Transportes (27 de febrero del 2020). *Firman convenio de colaboración SCT y Gobierno de Veracruz para impulsar proyecto de tren ligero metropolitano de la región capital*. Recuperado el día 02 de febrero del 2022 de

<https://www.gob.mx/sct/prensa/firman-convenio-de-colaboracion-sct-y-gobierno-de-veracruz-para-impulsar-proyecto-del-tren-ligero-metropolitano-de-la-region-capital?idiom=>

Secretaría de Gobernación (1997). Diario Oficial de la Federación. CONCESION que otorga el Gobierno Federal, por conducto de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en favor de Terminal Ferroviaria del Valle de México, S.A. de C.V. www.dof.gob.mx

Vázquez Robles, F. A., & Damián García, H. (2013). *Proyecto de factibilidad para establecer un ferrocarril foráneo de pasajeros en México.*

Vela, L. (2 de marzo del 2019). México el país que más gasta en transporte. *Dinero en imagen. Recuperado el 23 de abril del 2022c de* www.dineroenimagen.com/actualidad/mexico-el-pais-que-mas-gasta-en-transporte/107736

Villarreal Muñoz, M. (2020) *Assessment of Mixed Traffic Operation in Underutilized Rail Lines in Mexico: The Case of Study of the Mixed Traffic Tram-Train Located in Xalapa, Veracruz, Mexico.* [Tesis de maestría ,Universitat Stuttgart]. Repositorio Institucional-Universidad de Stuttgart.