

Universidad Autónoma de Chiapas

Colección Oro. Medio Siglo de la UNACH



INGENIERÍA DE TRÁNSITO

UNA VISIÓN SISTÉMICA

ERNESTO RAMOS CARBAJAL

RAUDEL FLORES MORENO



COLECCIÓN
ORO



Ingeniería de Tránsito

Una visión sistémica

Ingeniería de Tránsito

Una visión sistémica

Ernesto Ramos Carbajal
Raudel Flores Moreno

2024



Ingeniería de Tránsito

Una visión sistémica

ISBN UNACH: En trámite

ISBN ANUIES: En trámite

D.R. © 2024. **Universidad Autónoma de Chiapas**

Boulevard Belisario Domínguez Km. 1081 sin número,
Colina Universitaria, Terán, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

D.R. © 2024. **Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior**

Tenayuca # 200 Col. Santa Cruz Atoyac C.P. 03310 Alcaldía Benito Juárez Ciudad
de México, México

Autores

Ernesto Ramos Carbajal

Raudel Flores Moreno

Ambas Instituciones forman parte de la Red Nacional de Editoriales Universitarias y Académicas de México, Altexto y de la Asociación de Editoriales Universitarias de América Latina y El Caribe, EULAC.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura de los editores de la publicación; la información y el análisis de los contenidos en esta publicación son estrictamente responsabilidad de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de los textos aquí publicados, siempre y cuando se haga sin fines comerciales y se cite la fuente completa. Las imágenes de portada, la composición de interiores y el diseño de cubierta son propiedad de la Universidad Autónoma de Chiapas.

Esta publicación fue evaluada por pares académicos, mediante un proceso a doble ciego.

Hecho en México

Made in Mexico

Contenido

Mensaje del rector	13
Prólogo	17
Presentación	19
Introducción	23
Capítulo 1. Antecedentes y fundamentos	29
Historia del transporte terrestre	31
Evolución del transporte terrestre	32
Importancia del transporte terrestre	37
Importancia de la infraestructura vial	38
Fundamentos de la Ingeniería de Tránsito	40
Fundamentos legales de la Ingeniería de Tránsito en México	41
Tendencia y composición de la movilidad en México	42
La movilidad urbana para 2030	47
Capítulo 2. Elementos de la Ingeniería de Tránsito	51
Generalidades	53
El usuario	53
El usuario como conductor	54
El usuario como ciclista	63

El usuario como peatón	64
La vía	71
Generalidades	71
Clasificación de las estructuras viales	71
Categorías de clasificación oficial	76
Clasificación orográfica de las vías	78
Vehículos	79
Clasificación vehicular	80
Convertidores	83
Clasificación de los tractocamiones	86
Tipos de ejes	88
Agrupación de ejes	90

Capítulo 3. Sistemas Inteligentes de Transporte 99

Ventajas de los Sistemas Inteligentes de Transporte	102
Funciones de los Sistemas Inteligentes de Transporte	102
Clasificación de los SIT de acuerdo con sus aplicaciones	103
Gestión de operaciones	104
Ayuda al conductor (AC)	105
Sistema de pago electrónico	106
Información al viajero	106
Gestión del tráfico	107
Monitoreo y protección ambiental	108
Seguridad Pública	109
Transporte por demanda	110
Proyectos de SIT y su área de aplicación en el país	111
Sistemas de Pago Electrónico en Gestión del Tráfico	111
Sistemas de Pagos Electrónicos	111
Gestión del tráfico información al viajero	111

Capítulo 4. Características del tránsito	117
Generalidades de la Teoría de flujo vehicular	119
Parámetros microscópicos	121
Parámetros macroscópicos	127
Análisis de velocidades	128
Relación entre los tres parámetros básicos	131
Relación entre la velocidad y la densidad	131
Relación entre la tasa de flujo y la densidad	134
Relación entre la velocidad y la tasa de flujo	136
Capítulo 5. Funciones de volumen-demora	139
Generalidades de la Función Volumen-Demora	141
Propiedades fundamentales de la FVD	141
Relación entre velocidad y flujo	142
Funciones volumen-demora más empleadas	144
Función BPR	144
Función Cónica de Volumen-Demora	145
Función de Demora de Akcelik	146
Función generalizada costo-demora (generaliza la BPR)	147
Generalidades de la planificación mediante modelos de redes de transporte terrestre	150
Capítulo 6. Aforo vehicular	155
Generalidades de los aforos vehiculares	157
Análisis y determinación de volúmenes vehiculares	157
Tecnologías y tendencias actuales para la realización de aforos vehiculares	160
Clasificación de aforadores de tráfico	160
Metodología para estimar el TDPA	173

Determinación del TDPA mediante la distribución t-Student	175
Ajuste y expansión para volúmenes de tránsito a nivel urbano	176
Ajuste y expansión para volúmenes de tránsito a nivel urbano	177
Ajuste y expansión para volúmenes de tránsito a nivel rural	178
Ejemplo	179
Volumen Horario de Máxima Demanda	182
Ejemplo	182
Pronóstico de Volumen de tránsito futuro	185
Volumen horario máximo anual (VHMA)	186
Volumen Horario Décimo (10 VH), Vigésimo (20 VH), Trigésimo anual (30 VH)	186
Volumen horario de proyecto (VHP)	186
Clasificación de los proyectos de tránsito	187
Tránsito futuro	187
Tránsito actual	188
Incremento del tránsito esperado	188

Capítulo 7. Estadística	193
Generalidades	195
Determinación del número de muestra	195
Intervalo y nivel de confianza	197
Intervalo de confianza	197
Nivel de confianza	198
Tablas de frecuencia	199
Histogramas de frecuencia	202
Medidas de tendencia central	210
Media aritmética	211
Mediana	212

Moda	213
Relación empírica entre la media, la mediana y la moda	213
Media geométrica	214
Media armónica	214
Relación entre las medias aritmética, geométrica y armónica	215
Raíz media cuadrática	215
Cuartiles, deciles y percentiles	216
Cuartiles	216
Medida de dispersión	219
Recorrido o Rango	220
Desviación media, promedio o desviación absoluta	220
Recorrido semi-intercuartílico o desviación cuartílica	221
Recorrido del percentil 10-90	221
Desviación estándar o típica	221
Propiedades de la desviación estándar	222
Varianza	223
Capítulo 8. Capacidad y Niveles de Servicio	225
Generalidades	227
Capacidad	228
Condiciones bases o ideales	229
Nivel de servicio	233
Generalidades.	233
Nivel de Servicio A	234
Nivel de Servicio B	235
Nivel de Servicio C	235
Nivel de Servicio D	237
Nivel de Servicio E	238

Nivel de Servicio F	238
Nivel de servicio en carreteras de carriles múltiples	242
Análisis operacional	245
Metodología para la estimación del ν_s	246
Selección de la velocidad a flujo libre	247
Ajuste al volumen de demanda	247
Factor de ajuste por vehículo	248
Estimación de la capacidad y la densidad	249
Determinación del ν_s	249
Nivel de servicio en segmentos básicos de autopistas	249
Análisis operacional	252
Metodología para la estimación del nivel de servicios en tramos básicos de autopistas	253
Nivel de servicio en carreteras de dos carriles	256
Análisis operacional	258
Desarrollo de la metodología	259
Estimar la velocidad a flujo libre (ν_0)	259
Reflexiones finales	265
Referencias	269

Mensaje del rector

La conmemoración de los primeros 50 años de vida de la Universidad Autónoma de Chiapas marca un hito en su historia, no solo como una celebración del pasado, sino como un reflejo del compromiso de la institución con la educación, la investigación y el servicio a la sociedad. Estos cincuenta años representan un trayecto de esfuerzo, dedicación y adaptación a los cambios del entorno, consolidando a la UNACH como un referente en la formación académica en el sureste mexicano. En este contexto, el fortalecimiento de la investigación ha sido clave para impulsar la generación de conocimiento, desarrollando proyectos con pertinencia social y científica que responden a las necesidades locales, nacionales y globales.

Este aniversario subraya también el crecimiento de la producción académica, con un enfoque en la calidad y la innovación. La UNACH ha promovido la formación de cuerpos académicos y la creación de redes de colaboración que fortalecen el impacto de su labor investigativa. En este medio siglo, la universidad ha reafirmado su papel como un espacio de reflexión crítica y de desarrollo intelectual, comprometido con el avance de la ciencia y la tecnología, así como con la búsqueda de soluciones a los desafíos contemporáneos, siempre con un enfoque ético y de responsabilidad social.

En este marco surge la **“Colección Oro. Medio Siglo de la UNACH”**, integrada por 16 libros académicos, generados como resultado de las funciones de docencia o investigación, y cuyas personas autoras, adscritas a alguna Unidad Académica de nuestra Institución, cuentan con el reconocimiento del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNI) del Consejo Nacional de

Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) y se encuentran en la categoría de Candidata o Candidato a Investigadora o Investigador Nacional.

A través de esta iniciativa, respaldamos investigaciones en áreas clave, reafirmando nuestro compromiso con la excelencia académica y científica, al incluir libros de diversas áreas: Ciencias Agropecuarias, Ciencias Administrativas y Contables, Enseñanza de las Lenguas, Arquitectura e Ingeniería, Ciencias Sociales y Humanidades, Ciencias de la Salud, Ciencias Naturales y Exactas, Ciencias Jurídicas y Gestión Pública, y Sociedad e Interculturalidad.

Este logro ha sido posible gracias al esfuerzo y la participación de académicas y académicos de nuestra Universidad, quienes atendieron puntualmente la Convocatoria para esta Colección; agradezco y reconozco el compromiso de los evaluadores (externos a la UNACH) quienes, al realizar una dictaminación a doble ciego, garantizan la calidad de cada libro. Es importante recalcar que, para la publicación de esta Colección, ha sido fundamental el respaldo de la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES), organismo nacional que, al coeditar estos textos, reconoce la relevancia de cada uno de ellos y su contribución a la ciencia y la academia.

En este año tan significativo para nuestra universidad, confiamos en que la **“Colección Oro. Medio Siglo de la UNACH”** será un recurso fundamental para la comunidad universitaria y la sociedad en general, aportando conocimiento de interés, así como contribuyendo al desarrollo de nuevas ideas y soluciones a los retos que se enfrentan no solo en Chiapas, sino también a nivel internacional.

“Por la conciencia de la necesidad de servir”

Dr. Carlos F. Natarén Nandayapa

Rector de la Universidad Autónoma de Chiapas

Agradecimientos

Quemos agradecer y reconocer a todas las personas que de una forma u otra contribuyeron al desarrollo de este libro. De manera muy especial, al doctor Jorge Vázquez Gómez y a la doctora Rosa Laura Vázquez Grajales, por el tiempo y la dedicación en la lectura crítica y la retroalimentación realizada a este libro. Y a todos los que aportaron su conocimiento y compromiso para que este proyecto fuera posible.

Prólogo

Este libro expone de manera concisa los elementos básicos de Ingeniería de Tránsito con una visión sistémica y un carácter docente educativo. Esta obra logra que el lector pueda introducirse en el tema de forma gradual partiendo de una reseña histórica de los avances experimentados por el transporte terrestre desde sus orígenes. La importancia de su lectura radica en que México es un país con una amplia extensión territorial, por lo que gran parte de sus bienes y servicios se mueven mediante el uso del transporte carretero y ferroviario. El transporte terrestre y carretero tiene alta relevancia en el desarrollo económico actual del país, aportando gran parte del Producto Interno Bruto nacional.

En la obra, se identifican los diferentes elementos del tránsito que dan origen a la variedad de problemas que se presentan en la vía. Fundamentalmente y con una visión sistémica, se exponen en el texto características de calles y carreteras, conexiones viales o sus redes, terminales, contornos cercanos a las vías y la vinculación entre medios de transportes de forma concreta. Se describe el alcance de la Ingeniería de Tránsito y la correlación entre los diferentes elementos como: usuario, vehículo y vialidades.

Se identifican y exponen algunas normatividades empleadas en la actualidad y los principales elementos geométricos presentes en las vialidades. Se dan a conocer detalles de los dispositivos de conteo y monitoreo del tránsito, se ejemplifican y describen los SIT, entre otras tecnologías de información. Toda la

información está dirigida a su comprensión mediante la implementación de modelos de cálculo y el empleo de la ecuación fundamental del tránsito.

En uno de sus capítulos, el documento da a conocer los avances tecnológicos con base en los nuevos enfoques y análisis operativos, destacando los aspectos de cálculo matemático y estadístico. Con una visión sistémica y aplicando métodos prácticos y didácticos, muestra la Ingeniería de Tránsito como una ciencia enfocada en resolver asuntos de interés técnico y social. El libro está dirigido a estudiantes de nivel de pre y posgrado, académicos y profesionales del sector.

Manifiesto mi total conformidad con la obra y sé que será de mucho interés e importancia, ya que expone de manera correcta y concreta los elementos básicos de esta importante rama de la Ingeniería del Transporte. *Ingeniería de Tránsito. Una visión sistémica* será de gran apoyo para estudiantes de licenciatura y posgrado, mostrando elementos fundamentales de gran aporte a la sociedad en general.

Doctora Mercedes Nancy Hernández Rivero

Presentación

La escritura de este libro está fundamentada en la necesidad de disponer de literatura que agrupe un gran número de métodos y técnicas de análisis en la materia de Ingeniería de Tránsito para los futuros ingenieros en logística y transporte. El texto garantiza que los estudiantes o interesados en los temas de Ingeniería de Tránsito puedan disponer de información concreta y agrupada, dirigida al procesamiento matemático y estadístico para el estudio y el análisis de los parámetros vinculados con el tránsito y la movilidad.

El texto muestra una introducción donde se aborda la importancia de la Ingeniería de Tránsito para la civilización actual y enfocado a la relevancia de la transportación de bienes, mercancías y personas. Los contenidos de los capítulos se mencionan a continuación:

Capítulo 1. “Antecedentes y fundamentos”. En este capítulo se abordan elementos históricos del transporte terrestre, su evolución mediante una serie de hechos cronológicos que contribuyeron al avance continuo del transporte ferroviario y carretero. Esto nos lleva a comprender la importancia que representa la movilidad y el transporte para la sociedad actual y futura. Se da a conocer la importancia de la infraestructura vial, ya que sin ella se hace imposible el transporte carretero. La Ingeniería en Transporte de forma general y la rama en tránsito son de importancia social, económica y política; además, se exponen los elementos que la fundamentan legalmente. Las tendencias y la composición de la movilidad en México se explican de forma detallada con datos actualizados del INEGI.

Capítulo 2. "Elementos de la Ingeniería de Tránsito". Esta sección expone de manera esencial y con un enfoque sistémico de ingeniería, los principales elementos del tránsito. Se describe con claridad la clasificación de las carreteras y autopistas con sus componentes; se tratan las diferentes categorías que toma el usuario en la vía, la clasificación de los vehículos, según las normas mexicanas existentes y aplicadas al sector.

Capítulo 3. "Sistemas Inteligentes de Transporte". En esta parte del texto, se define lo que son los Sistemas Inteligentes de Transporte, sus aplicaciones prácticas en la vía y las tecnologías más usadas en la actualidad. Se muestra la potencialidad de estos sistemas y sus ventajas, dejando clara la importancia de su implementación para el desarrollo de la movilidad y las mejoras en la circulación vehicular.

Capítulo 4. "Características del tránsito". Se expone en esta parte la aplicabilidad matemática de la Ingeniería de Tránsito mediante el empleo de la ecuación fundamental del tránsito. Se expone la relación gráfica entre el volumen, la velocidad y la densidad de tránsito como parámetros macroscópicos. Se deja clara la forma de estimar los parámetros microscópicos de la corriente vehicular, tanto los espaciales, como los temporales. Se estudian algunos cálculos básicos apoyados en la gráfica espacio-tiempo con el estudio de la trayectoria vehicular. Se explica con claridad la determinación del intervalo y el espaciamiento promedios a partir de la representación gráfica de la trayectoria vehicular.

Capítulo 5. "Funciones volumen-demora". En esta sección se expone la importancia de conocer la relación entre el volumen y la demora mediante la explicación de las funciones más conocidas y aplicadas actualmente para resolver problemáticas de movilidad y tránsito.

Capítulo 6. "Aforo vehicular". En esta sección del libro se va específicamente a la determinación y la estimación de los diferentes volúmenes de tránsito. Se parte del concepto de conteo o aforo vehicular explicando la importancia y los métodos de recolección de información de campo. También se agregan métodos para el procesamiento de los datos obtenidos en mediciones y conteos prácticos, destacando las tecnologías actuales que facilitan el conteo, ya sea de peatones, vehículos motorizados y no motorizados.

Capítulo 7. "Estadística". Este capítulo básico, pero elemental dentro de la Ingeniería de Tránsito, es bastante simple y detallado. Aquí se exponen de

manera resumida y precisa los métodos estadísticos usados para la descripción y el procesamiento de datos primarios, determinación del número de muestra, obtención de tablas e histogramas de frecuencias, medidas de tendencia central y de dispersión.

Capítulo 8. "Capacidad y niveles de servicio". Se define el concepto de capacidad, se realiza un análisis sistémico del término con sus respectivas ecuaciones de cálculo. Se clasifican y definen los diferentes niveles de servicio, se describen términos asociados y se da a conocer la metodología para determinar el nivel de servicio en tramos de autopista, carreteras de dos carriles y carreteras de múltiples carriles.

El libro contiene información precisa con metodologías de cálculo, que aporta a los conocimientos básicos y necesarios de Ingeniería de Tránsito, con una visión sistémica y resumida.

Introducción

El transporte es esencial para garantizar el crecimiento y el desarrollo económico de cualquier sociedad, logrando conectar a las personas con servicios necesarios, como la atención de salud y la educación, entre otros. De forma básica podemos definir el transporte como el movimiento de artículos y personas de un lugar de origen a un destino, o bien como el movimiento de seres humanos, bienes o productos desde el lugar de producción a zonas de comercialización, distribución, consumo o almacenamiento. El transporte se clasifica en dos grandes grupos: primero, el de carga; y segundo, el de pasajeros. También el transporte puede ser clasificado según el medio y el modo. El modo es la parte física por donde se desplazan los vehículos, los cuales se encargan del traslado de personas, mercancías y bienes, y estos pueden ser aéreos, marítimos, fluviales y terrestres. Se conoce como medio de transporte a las entidades (vehículo) que poseen similitud tecnológica, operativa y administrativa. Existe una gama variada de vehículos que cambian en su forma, velocidad, capacidad y tipo de energía que emplean para su movimiento. La necesidad de transportación del ser humano se remonta al propio origen de la humanidad; claramente, esta necesidad de desplazarse a sí mismo y de mover artículos y bienes fue acrecentándose con el paso del tiempo, cuando al ser humano se le hizo crucial moverse a grandes distancias hacia nuevos territorios, inicialmente desconocidos, buscando su colonización y posteriormente en etapas de conquistas. La comercialización de bienes y servicios en la actualidad es imprescindible para el desarrollo de ciudades

y países en general. Dentro de la comercialización, el transporte terrestre juega un papel fundamental. Desde tiempos remotos, el ser humano tuvo la necesidad de desplazarse sobre la superficie de la Tierra y para esto empleaba su propia anatomía hasta el 3,000 a. C., cuando comienza la domesticación de animales, como camellos, elefantes, caballos, etc. La domesticación de animales le permitió facilitar el movimiento de artículos así como su propio desplazamiento.

Actualmente, se buscan ciudades compactas con el objetivo de mitigar los efectos negativos para la movilidad que provoca el crecimiento poblacional en las ciudades. Mientras mayor es la población y el tamaño de las zonas urbanas, más difícil se torna la distribución de bienes y servicios a los ciudadanos. Al aumentar la zona urbana y la cantidad de habitantes en las poblaciones, aumenta la necesidad del consumo de recursos y las distancias de entrega. Todos estos factores afectan notablemente la movilidad y aumentan la emisión de gases contaminantes al ambiente, creando daños a la salud y al planeta.

Cuando se habla del término movilidad dentro de la Ingeniería del Transporte se va más allá de los desplazamientos físicos de un lugar a otro (Korstanje, 2013). La realidad actual de la sociedad debe ser entendida a partir de la comprensión del término movilidad, ya que es un gran desafío para la vida urbana contemporánea (Cabrera Velásquez y Orozco, 2015).

Es importante tener en cuenta, cuando se habla de movilidad, los efectos de la congestión vehicular, que es inversamente proporcional al aumento en la demanda de la vialidad en cuestión, ya que la influencia de la congestión vehicular afecta hasta en un 3.5 % el PIB de América Latina (Thomson y Bull 2002, Lupano y Sánchez, 2009). Cabe destacar que la movilidad tiene una notable influencia económica, ya que la mayor parte de la sociedad está atada de forma directa o indirecta al transporte terrestre.

Se deben buscar políticas públicas que de una manera razonable den soluciones de movilidad, siendo uno de los primeros objetivos para el Desarrollo del Milenio, establecidos por la Organización de Naciones Unidas (Pardo, 2012). En él se persiguen tres puntos esenciales: calidad de vida, eficiencia del transporte y la sostenibilidad, teniendo siempre presentes las externalidades de la influencia económica (Lupano y Sánchez, 2009; Pardo 2012).

La movilidad es parte fundamental de la vida urbana, de la cultura y un importante elemento del avance político, económico y sociocultural por sí mismo (Lange, 2011), influyendo en los modos de vida de los habitantes.

La Ingeniería de Tránsito en el mundo ha tomado gran importancia; por tal razón, países como Estados Unidos, México y Colombia están invirtiendo muchos recursos montando tecnologías de avanzada llamados Sistemas Inteligentes de Transporte, como dispositivos de monitoreo para vehículos de transporte de pasajeros y de carga, redes de semáforos inteligentes y la gestión integral de autopistas y túneles (Quintero, J., & Prieto, L., 2015).

La economía está ligada a la movilidad, como ya se ha explicado, creando movilidad de capital y del sector laboral dando surgimiento a nuevos espacios de producción y consumo (Cruz-Zúñiga, 2016). En la organización territorial, el modelo de exportación nacional se produce a menor escala, al diversificarse los servicios y segmentarse los mercados (Jordán *et al.*, 2003).

Según Vivas y Ribera (2007), actualmente se buscan propuestas de construcción que garanticen crear espacios para transitar y descansar aumentando los espacios de movilidad.

El nuevo término de ciudadano móvil permite que el individuo pueda hacer un uso racional del tiempo de viaje, involucrando sus gustos personales durante el mismo. Esto se debe a que, gracias a la incorporación de los avances tecnológicos, se ha aumentado el confort en los viajes siendo estos más cómodos y rápidos, permitiendo al viajero aprovechar mejor su tiempo (Korstanje, 2013).

La Ingeniería de Tránsito se encarga de los proyectos geométricos, ya que constituyen una etapa importante dentro de esta ciencia y es un subconjunto de la Ingeniería del Transporte. El proyecto geométrico de calles y carreteras es el proceso de correlación entre los elementos físicos y las características de operación de los vehículos. (Cárdenas, G., James., 2013).

El Instituto de Ingeniería del Transporte de los Estados Unidos de América define la Ingeniería del Transporte de una manera muy clara, como se muestra a continuación:

Aplicación de los principios tecnológicos y científicos a la planeación, al proyecto fundamental, a la operación y a la administración de las diversas partes de cualquier modo de transporte, con el

fin de proveer la movilización de personas y mercancías de una manera segura, rápida, confortable, conveniente, económica y compatible con el medio ambiente. (Institute of Transportation Engineers, 2009)

También se define la Ingeniería de Tránsito usando la terminología siguiente:

Aquella fase de la Ingeniería del Transporte que tiene que ver con la planeación segura y eficiente, el proyecto geométrico y la operación del tránsito por calles y carreteras, incluyendo sus redes, terminales, tierras adyacentes y su relación con otros modos de transporte. (Institute of Transportation Engineers, 2006)

Según Roess, Prassas *et al.*, 2011, la tendencia futura de la Ingeniería de Tránsito está dirigida a seis factores fundamentales:

1. Sistemas intermodales
2. Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT)
3. Conservación de la funcionalidad y de la capacidad del sistema vial
4. El manejo de la congestión
5. El aseguramiento de la movilidad
6. Impacto ambiental

Por todo lo antes expuesto, es indudable la importancia para la sociedad actual del empleo de los medios de transporte para lograr un comercio nacional o internacional que satisfaga las necesidades de las poblaciones modernas. Para facilitar de manera óptima el movimiento de personas, bienes y servicios, es preciso desarrollar técnicas y métodos que logren avances notables en la Ingeniería del Transporte. La Ingeniería de Tránsito es esencial en la formación de ingenieros que realizarán su labor en áreas relacionadas con el movimiento mediante el transporte terrestre. La Ingeniería de Tránsito como ciencia se desarrolla día a día y su evolución se modifica con la necesidad y el avance de la tecnología a nivel mundial. La importancia de la Ingeniería de Tránsito se puede resumir en dos aspectos elementales:

1. El transporte terrestre es el más usado actualmente a nivel global y el más eficaz en la entrega de productos al cliente final.
2. Las vías y las carreteras son los elementos adecuados para permitir el movimiento de los modos de transporte terrestre.

Hoy más que nunca, estando inmersos en la era de las comunicaciones, se hace necesario disponer de ingenieros en logística y transporte que dominen la Ingeniería de Tránsito permitiéndoles usar esta ciencia en favor de la calidad, la eficiencia, la inmediatez y la optimización de los sistemas y las redes de transporte de pasajeros y de carga por medio terrestre.

Capítulo 1

Antecedentes y fundamentos



Historia del transporte terrestre

En este capítulo deseamos ilustrar al lector de forma cronológica cómo ha ido evolucionando el transporte terrestre carretero y ferroviario, citando un conjunto de antecedentes de relevancia histórica.

El desarrollo de los medios de transporte carretero estuvo frenado tecnológicamente y era poco eficiente hasta el surgimiento de los caminos y carreteras, estos permitieron mejorar la velocidad de circulación y la *accesibilidad* a zonas más intrincadas. Un descubrimiento que permitió un gran salto tecnológico fue la invención de la rueda hacia el año 5,000 a. C., en Mesopotamia (Asia Menor), estas superficies de rodamiento permitían la circulación del incipiente tránsito de la época (AASHTO, 1952).

Existen invenciones históricas notables que contribuyeron directamente al desarrollo del transporte terrestre de mercancías y personas, logrando con el paso del tiempo, en diferentes localización y civilizaciones, continuas mejoras que logran hacer cada vez más eficiente el movimiento a lo largo del paso de los siglos.

Entre algunas invenciones importantes que marcan el inicio del desarrollo del transporte terrestre, destaca la invención en 1,500 a. C. de carros tirados por caballos u otros animales. Este último es un ejemplo de la expansión del transporte con el uso de animales como mejora del modo de transporte terrestre de personas y bienes. En el período grecorromano aparecen los primeros caminos donde se aplica ingeniería básica en Grecia y Roma. No se puede dejar de comprender que el desarrollo del transporte carretero se basa en la preexistencia de caminos y carreteras que permitan el desplazamiento de

estos medios de transporte. En el año 1,000 se hacen las primeras modificaciones de arnés y otros elementos de control para los animales usados para la carga, permitiendo aumentar la velocidad de movimientos de este tipo de vehículos y aumentando su capacidad de carga. Pasado 100 años, comienza el uso de herraduras y accesorios para mejorar el transporte con animales, ya sea de carga o personas. En el año 1,500 aparecen las primeras vagonetas con rieles para uso en minas y zonas confinadas, siendo este el primer paso para la futura implementación de ferrocarriles. Leonardo da Vinci, en 1,600, presenta los primeros proyectos del diseño de algunos aparatos que en teoría servirían para el transporte. En 1662 Blaise Pascal implementa y pone en circulación el primer sistema de transporte público de pasajeros en Francia, específicamente en París. Para el año 1700 se ve en el antiguo continente, fundamentalmente en Francia e Inglaterra, un auge y mejora en la construcción de caminos para facilitar el acceso y la movilidad terrestre. Dada la necesidad de mejorar la infraestructura de las vías de acceso, en 1747 Francia crea la Escuela de Puentes y Caminos, comenzando a implementar técnicas y métodos para lograr la durabilidad de los caminos. Un avance notable fue cuando en 1769 Nicolas Joseph Cugnot hace circular en la capital de Francia el primer vehículo autopropulsado de vapor, que sería el ancestro común entre los camiones y coches.

Evolución del transporte terrestre

Según la Secretaría General de Obras, Comisión de Vialidad y Transporte Urbano, con información publicada en el año 1993, el transporte público mediante vías férreas de forma masiva se inauguró con la puesta en funcionamiento de los tranvías, a finales del siglo XIX. Al inicio fueron movidos mediante tracción animal, con posterioridad avanzaron a sistemas mecánicos y, finalmente en ese mismo siglo, llegaron a funcionar movidos con energía eléctrica.

Otro avance del transporte en ferrovías es el caso de Richard Reynolds en 1770, que construyó en Inglaterra vagones para el uso minero que se desplazaban por rieles. En este mismo país, veinte años después, en 1790, John Metcalf construye varios caminos cimentados en Inglaterra; estos caminos muestran un poco más de avance de ingeniería, ya que les coloca zanjas laterales para el desagüe y les dota una forma convexa. Mas adelante, en 1791 el conde

de Sivrac construye el primer vehículo parecido a las bicicletas actuales llamado "céléríte". Uno de los primeros ferrocarriles aparece en Inglaterra en 1801 y es instalado por Surrey; este ferrocarril era tirado por caballos y se movía de Wandsworth a Croydon. La primera locomotora se le atribuye a Richard Trevithick en 1804. Un ejemplo de la expansión en el uso de las locomotoras de la época fue once años después, específicamente en 1813, cuando se utilizan las locomotoras de vapor para dar servicio en algunas minas de carbón del noreste de Inglaterra. Se extiende el uso de las locomotoras en ese mismo año sacándolas de las minas de carbón y siendo usadas sobre rieles metálicos, aunque aún no se les dio un uso comercial.

Pasando al ámbito del transporte carretero en 1814, el notable inglés Telford, debido al rápido deterioro de los caminos existentes, aplica las nuevas técnicas desarrolladas hasta el momento aplicando la cimentación y reconstruye el camino a Glasgow. Dada la necesidad de mejora de los caminos como infraestructura básica para el transporte carretero, fue necesario crear normas para la construcción. En 1815 en Inglaterra, se estandarizan los caminos de tipo macadam, que hacían uso de una superficie de grava o piedra apisonada, en forma de arco. Al barón Kart Von Drais se le atribuye la creación del antecedente de la bicicleta, aunque otros habían creado ya artefactos similares; en 1817 creó el caballo mecido, este a diferencia de las bicicletas actuales, se impulsaba con los pies en el suelo. En 1825, George Stephenson pone en funcionamiento y de forma pública un servicio ferroviario entre Stockton y Darlington, Inglaterra. Con los grandes avances que ya se habían obtenido en el desarrollo automotriz, en 1828 aparece el primer servicio de ómnibus en la capital de Francia. Y para mayor avance en el área del transporte terrestre, aparece en las ferrovías un equipo autopropulsado que fue puesto en funcionamiento en 1829 por Stephenson, bajo las normas de la época para el traslado de personas y carga, entre Manchester y Liverpool. Con lo antes presentado, se pone de manifiesto la importante respuesta que constituyen los sistemas de transporte para las actuales y crecientes sociedades modernas, ya que no sería posible satisfacer sus necesidades sin un sistema eficiente de transporte y movilidad.

Pasando al nuevo continente, específicamente en los Estados Unidos de América, en 1830 se instala la primera red de tranvías de caballos en la ciudad

de Nueva York; en estos momentos los mayores avances del transporte terrestre se experimentaban en Europa. En el año 1850 se modifica la técnica de construcción de caminos, comenzando a usar un sistema de compactación mediante rodillos pesados y con la incorporación de alquitrán y asfalto en la composición de estos, siendo los primeros pasos de la formación de calzadas. En 1858 se introducen mejoras en el confort de los servicios de pasajeros que se trasladan mediante ferrocarril, aparecen coches con camas, comedores para ingerir alimentos durante los largos viajes y para mayor seguridad se incorporan los frenos de aire.

En 1860 Jean Joseph Etienne Lenoir, nacido en Bulgaria, construyó un motor de combustión interna, era muy similar a los motores de vapor de la época, este fue el motor de mayor producción y comercialización en esos tiempos.

De forma oficial y a gran escala, en Londres se inaugura en 1863 el primer servicio urbano de ferrocarril para pasajeros. En Escocia se implementan los primeros caminos de concreto cerca del año 1865, desde este país comienza sus avances el desarrollo del transporte por carretera. También se puede contar como desarrollo la adaptación de un motor a una bicicleta realizada por Michaux en el año 1869, siendo considerada históricamente como la primera motocicleta. En los avances ferroviarios, destaca cuando en 1869 ponen en funcionamiento el freno de aire para ferrocarril. La popularización de la bicicleta ocurre años después, en 1871, siendo líder en ese momento la bicicleta diseñada por James Starley en Inglaterra.

En 1876, a Nikolaus August Otto, un talentoso ingeniero, se le atribuye el primer motor de cuatro tiempos y que además era de combustión interna. Estos motores disponen de un régimen térmico específico y con principios de funcionamiento muy diferentes a las máquinas de vapor, ya que estas transforman la energía química del combustible fósil en movimiento mecánico.

En el año 1879, oficialmente se considera la construcción del primer tren eléctrico. Así, en la Exposición de Berlín, como muestra de lo mencionado anteriormente, la empresa Siemens emplea un pequeño vehículo ferroviario impulsado por energía eléctrica.

El primer semirremolque apareció en 1881. Era un tractor construido por De Dion-Bouton y era propulsado por vapor. Como primer servicio público movido por electricidad en el mundo, se considera el tranvía eléctrico en 1881,

en Lichterfelde, a las afueras de Berlín. A pesar de que ya hacía años que existía el motor de combustión interna, en 1883 por primera vez se acopla a una locomotora en Alemania.

El diseño de un automóvil muy parecido a los actuales y que opera con un motor de combustión interna se le atribuye a Daimler, en 1886, en Stuttgart; y a Carl Benz en Manheim, Alemania. La creación de estos automóviles se ve reforzada con la invención de los neumáticos en 1888 por John Dunlop. Aparejado al desarrollo de los medios de transporte carreteros está el ferroviario; en 1891-1902 logran construir el tren Transiberiano, uniendo Moscú con Vladivostok, que era capaz de recorrer 9,000 km en aproximadamente nueve días. Estas grandes máquinas se fortalecen aún más cuando en el año 1893 aparecen los primeros motores diésel y la automatización de algunas señales ferroviarias.

El que fue conocido como el primer camión de la historia se le atribuye a Karl Benz en el año 1895; en este mismo año, entran en servicio los autobuses de gasolina en Estados Unidos. Un año después y para lograr una mayor eficiencia en este tipo de vehículos, Gottlieb Daimler construye un camión más desarrollado que alcanza una velocidad superior con una reducción en el gasto de combustible. Todos estos vehículos ya poseían un potente motor de combustión interna que representaban un gran avance tecnológico frente a las máquinas de vapor de la época o los motores de combustión externa. Ya para la década de 1900 aparece el genio Henry Ford, quien industrializa la producción de automóviles, llevando a una escala mundial su distribución.

Desde 1912 comienzan los ingenieros e inventores de la época a implementar nuevas tecnologías en busca de mejorar los automóviles y se instala por primera vez el arranque eléctrico en automóviles. A pesar de estos avances, los camiones con generador de vapor continuaron su distribución en Estados Unidos y Francia hasta comienzos de la Primera Guerra Mundial.

Otro acontecimiento destacado en este proceso de la modernización del transporte terrestre fue la inauguración de un servicio de correos, el cual realizaba un solo viaje redondo al día entre las importantes ciudades de Washington y Nueva York, en el año 1918. En 1920 se incrementa a nivel mundial el uso de las locomotoras diésel.

En 1930 se logra implementar el uso del bastidor rígido para los coches que permitían un mejor acople de las ruedas y otros sistemas, garantizando que alcancen mayores velocidades y un mejor desplazamiento por zonas irregulares. En el año 1934, los Estados Unidos ponen en marcha el primer tren de carga tirado por una locomotora diésel. En ese mismo año, sale el Fraction Avant, primer tren con suspensión independiente y tracción delantera fabricado por Citroen, aunque no era de grandes dimensiones. Un hecho histórico que se dio en Alemania fue la aparición del primer Volkswagen en 1934, diseñado por Ferdinand Porsche. Un año después, el autorrail Bugatti alcanza velocidades nunca vistas con un valor de 130 km/h en promedio, este vehículo se movía de París a Estrasburgo. Hasta el año 1964 se alcanza una velocidad en ferrovías de 210 km/h con el tren japonés Tokaido; dicho tren movía pasajeros desde Tokio hasta Osaka con la inauguración de la línea Sinkansen. En 1981, en Europa, precisamente en Francia, entra en función el tren de gran velocidad (TGV) alcanzando la velocidad de 380 km/h, siendo el más rápido del mundo.

Después de 1945, aumentan los avances en el área del transporte terrestre, esto se debe a que los conflictos bélicos redirigen las fuerzas productivas de los países involucrados, redestinando gran cantidad de recursos a los avances tecnológicos con el fin de tener una ventaja estratégica en el conflicto. La Segunda Guerra Mundial no fue la excepción; este conflicto que comenzó en 1938 con el ataque a Polonia por Alemania, logró revolucionar la ciencia y la técnica en este ámbito.

Desde el año 1885, el ingeniero escocés Thompson ya había creado los neumáticos, que sustituyeron las gomas macizas, reduciendo las vibraciones y aumentando el coeficiente de fricción para un mayor agarre del vehículo con la superficie del suelo. Pero después de la Segunda Guerra Mundial se lograron avances en el mejoramiento de los neumáticos empleando el caucho, lo que garantizó diseños más eficientes basados en especificaciones como el tipo de suelo, presión de aire, tipo de clima, coeficiente de fricción, adherencia, entre otros aspectos. Estos neumáticos de caucho eran muy superiores a los diseñados en 1888 por John Dunlop en Irlanda.

Después de 1945, con el final de la guerra se expandieron los motores de arranque de tipo eléctrico, se adicionan frenos más potentes, aparecen los motores de 4, 6 y 8 cilindros, aparecen los vehículos de cabina cerrada a los que

se les incorporan sistemas de iluminación interna. También los fabricantes como Renault y Ford se dedican a la fabricación y la comercialización de los camiones pesados apareciendo los primeros semirremolques modernos. Como ejemplo de la continua incorporación de los avances en la electricidad implementados en los vehículos, está el caso de los primeros arranques eléctricos que se instalan en motocicletas en el año 1950. Un récord en velocidad terrestre importante después del gran conflicto bélico fue el ocurrido en 1983, cuando Richard Noble, diseña un vehículo impulsado por un motor de avión de caza, al cual llamó "Trust II", que alcanzó los 1,033 km/h. Otra muestra de los avances en el transporte terrestre sucedió en el año 1987, cuando en los Estados Unidos se diseña un automóvil solar llamado Sunraycer, que se desplazó 3,220 kilómetros. Este vehículo solar fue probado por primera vez en el continente australiano en una carrera promocional de la General Motors con una inversión total de más de un millón de dólares.

Importancia del transporte terrestre

En la actualidad, la población mundial ha tenido un comportamiento demográfico bastante peculiar, experimentando un crecimiento en los últimos años. El crecimiento actual ha logrado triplicar la población de mediados del siglo xx. La población mundial en enero de 2024 fue de 8 019 876 189 habitantes, esto supone un aumento de 0.95 % con respecto al año 2023. El crecimiento poblacional trae aparejada una serie de situaciones negativas, como: deterioro del planeta, escasez de alimentos, aumento de la tasa de desempleo y una creciente demanda de bienes y servicios. La única forma de lograr llevar los bienes de consumo y disponer de servicios acorde a las demandas cada vez más crecientes de los clientes, es haciendo uso de sistemas logísticos avanzados. Hacer uso de estos sistemas logísticos, que fundamentalmente se mueven por modo terrestre, requiere de infraestructura básica, que son las vías y carreteras. Teniendo en cuenta el aspecto de movilidad, la infraestructura carretera es de vital importancia, ya que una población con buena infraestructura vial es más competitiva, permite la entrega oportuna de bienes y servicios y disminuye la tasa de desempleo. Todo esto aumenta la calidad de vida, reduce costos de vida e incrementa la economía de los ciudadanos, mediante la integración socioeconómica. Los beneficios de las carreteras se resumen en

buena conectividad, más empleos, aumento de la economía a todos los niveles, seguridad vial para vehículos y peatones, reducción de costos.

Importancia de la Infraestructura vial

La Secretaría de Infraestructuras, Comunicaciones y Transportes (SICT), se encarga de estimular la implementación de sistemas de transporte y comunicaciones seguros, eficientes y competitivos, mediante un marco jurídico adecuado, la implementación de políticas públicas y la creación de estrategias que promuevan y garanticen un desarrollo sustentable y sostenible de la economía, manteniendo el equilibrio social del país. Se encarga también de aumentar la cobertura y el acceso de los mexicanos a los servicios fundamentales.

Según la propia SICT, en México más de 55 % de las mercancías que se movilizan lo hacen usando el transporte terrestre, mientras que 90 % de los pasajeros también realizan sus traslados por vía terrestre. De esta forma, queda claro que la infraestructura vial es de una importancia notable en el desarrollo de la nación.

Sin la inversión en un sector primario, como lo es el de las vías y carreteras, no sería posible el desarrollo económico de la sociedad. Esto eleva la competitividad de las empresas, las que a su vez satisfacen las necesidades elementales de la población aumentando la productividad de los diferentes sectores. Las vías y carreteras en buen estado permiten una mayor fortaleza de la industria nacional, mejoran el proceso de producción, distribución y comercialización. Siendo México un país con gran inversión en el sector turístico, el turismo en el año 2022 y con base en datos del INEGI, aportó al PIB del país un estimado de 8.5 %, siendo un beneficio notable en la economía nacional. Según el dato anterior, cabe destacar que no sería posible un turismo de excelencia sin disponer de una adecuada infraestructura carretera. El desarrollo estratégico de los sistemas viales y la procuración de su calidad, son referente de la evolución de una civilización. La correcta comunicación vial y su eficiencia determinan en gran medida el nivel de desarrollo de una región, sociedad o nación.

Está claro que las vías y carreteras son la columna vertebral del transporte terrestre, por lo que tienen un valor incalculable en el desarrollo del comercio nacional y exterior de la nación, su construcción y mantenimiento son imprescindibles.

Con lo anterior se demuestra que una obra vial requiere de una buena planificación, diseño y elaboración para que su funcionalidad garantice una buena movilidad. Cuando se lleva a cabo una obra vial que cumple con criterios válidos y las normatividades vigentes y apropiadas para el lugar de montaje, se logran reducciones en los costos operativos, mejor integración con la naturaleza del entorno, menos afectaciones al medio ambiente y protección de la fauna y la flora endémica de la región. Al momento de la elaboración de un proyecto de este tipo, el cumplir con los criterios establecidos se logra mejorar la movilidad con la menor afectación, permitiendo el disfrute de los beneficios de disponer buenas vías y carreteras por un mayor periodo.

Según la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), la construcción y el mantenimiento de infraestructura vial y carretera genera cerca de 5.6 millones de empleos, siendo aproximadamente más de 13 % de los empleos totales existentes.

Las vías y carreteras permiten movernos con cierto margen de libertad y seguridad de un lugar a otro, y también mover mercancías y materias primas necesarias para diferentes actividades diarias. La seguridad vial es de interés nacional, ya que sin este aspecto la eficiencia de las carreteras se vería notablemente afectada. Por eso, la importancia en el diseño, la correcta señalización y el posterior mantenimiento de las vías terrestres. El diseño actual de todos los elementos viales está enfocado en garantizar una disminución significativa de los puntos de conflicto, disminuyendo el peligro o la probabilidad de accidentes y aumentando la capacidad de visibilidad de los conductores. La señalización permite dar la orientación y la información necesaria para los usuarios de la vía, tales como velocidad adecuada, dirección correcta de giro, acciones permitidas, avisos importantes y otras indicaciones para el orden y el correcto funcionamiento. Como último aspecto está el mantenimiento, que se encarga de conservar el estado técnico y funcional de las vías en el tiempo, garantizando la capacidad óptima de trabajo de las vías.

Es evidente que la construcción de infraestructura vial también tiene una parte negativa o riesgos, como son los costos elevados (presupuesto), accidentes o lesiones, mala planificación y elaboración de bajos estándares de calidad provocando afectaciones ambientales. En la actualidad, siempre se tiene en cuenta el impacto de la obra en el ambiente para minimizar el daño mediante el empleo de

criterios de protección ambiental y normas locales, nacionales e internacionales creadas con este fin.

Entre las principales afectaciones al ambiente que pueden ser ocasionadas durante la construcción de carreteras si no se toman las medidas adecuadas, se encuentran: la deforestación, el exterminio de especies endémicas, la destrucción del hábitat de insectos, reptiles, aves, etc. La erosión del suelo afecta el nivel de infiltración de agua y el aumento de la temperatura por el bloqueo que provocan los materiales asfálticos y el concreto. La forma de minimizar estos daños es mediante la correcta implementación de las normas de construcción de carreteras; dichas normas son muy cambiantes de acuerdo con la región y el país, y dependen de estándares técnicos y de calidad establecidos por instituciones del propio país o por acuerdos universales. Por estas razones es importante conocer e implementar las normas generales existentes aplicables a la mayoría de las condiciones. Dentro de estas se pueden mencionar, normas de diseño, normas de seguridad, normas técnicas, normas ambientales y normas de calidad. Las normas de construcción de carretera son importantes para el correcto funcionamiento de las vías y permiten que cumplan con los requerimientos provocando las menores afectaciones posibles.

Fundamentos de la Ingeniería de Tránsito

Esta rama de la ciencia en particular basa su estudio en la planificación, diseño y operación del tráfico, las redes de transporte, las infraestructuras, las zonas y los terrenos colindantes y su vinculación con los medios de transportación. Su objetivo fundamental está en lograr una movilidad óptima, segura, rápida, eficiente y económica de bienes, servicios y pasajeros.

Se estudian y analizan de manera crítica características de los elementos fundamentales del tránsito que son el vehículo, el usuario y las vialidades. De aquí surgen parámetros como velocidad, volumen y densidad vehicular dándonos la ecuación fundamental del tránsito.

También se analizan diferentes fenómenos dentro del tránsito y la movilidad como capacidad de las carreteras y autopistas, accidentes; diferentes pasos, como los pasos a nivel o desnivel superiores e inferiores; terminales, estaciones e intercepciones, entre otros. Esta ciencia tiene en cuenta fenómenos como las reacciones del usuario y su interacción con el vehículo cuando funge como conductor.

Como se sabe, la civilización y su creciente necesidad de moverse de un lugar a otro, ya sea para la búsqueda de alimentos, colonizar nuevos territorios, por curiosidad o por el deseo de contacto e intercambio de bienes, implica el desarrollo y la mejora continua de los medios de transporte.

El desarrollo concreto de la Ingeniería de Tránsito actual, surge a partir de la existencia de vehículos y la necesidad de crear vías aptas para movilizarlos. Esta relación entre el ser humano como eje central y sus necesidades ha obligado a técnicos y especialistas a estar continuamente en la búsqueda de mejores infraestructuras, regulaciones y métodos de transportación.

El esfuerzo en esta rama de la ciencia ha logrado en los últimos años un desarrollo notable en el transporte terrestre. Buscando la eficiencia y la construcción de ciudades más limpias y sostenibles con normas que protegen el ambiente y evitan cada día más la contaminación.

Fundamentos legales de la Ingeniería de Tránsito en México

En México, existen regulaciones nacionales que se nutren de la experiencia internacional en el área. La SICT, como despacho del poder ejecutivo federal, cumple funciones de ministerio en todo lo relacionado con infraestructuras para las comunicaciones y el transporte. La SICT fue creada el 13 de mayo de 1891, como Secretaría de Comunicación y Obras Públicas; posteriormente, desde el 1º de diciembre de 1958 se le conoció como Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), la que desde el 20 de octubre de 2021 modifica su nombre y pasó a llamarse como la conocemos hoy día, SICT.

La SICT tiene como función principal el diseño, la planificación, la ejecución y la coordinación de las políticas públicas referidas a infraestructuras de comunicación. El transporte de bienes, servicios y pasajeros usando transporte terrestre es una función que también realiza esta secretaría. La SICT se encarga también dentro de otras funciones de Caminos y Puentes Federales, pudiendo otorgar, retirar o renovar las concesiones para operación de medios de comunicación y transporte. Por ende, el desarrollo de la Ingeniería de Tránsito como ciencia debe estar amparada en las normas y regulaciones establecidas por esta secretaría, ya que también dirige la construcción de infraestructuras públicas para el transporte.

Si estudiamos a fondo las funciones de la SICT, podemos deducir y entender que no puede haber una correcta implementación nacional de la Ingeniería de Tránsito, sin el vínculo directo con esta dependencia.

Las funciones que cumple la SICT, están bien especificadas en la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, principalmente en el artículo 36.

Para establecer ciertas normatividades, por lo general es necesario el respaldo en conocimientos previos, con base en normas anteriores, por lo que la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017 no es la excepción. Por ejemplo, las unidades de medida empleadas en documentos técnicos se amparan en la Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, Sistema General de Unidades de Medida.

Tendencia y composición de la movilidad en México

México en los últimos años está inmerso en la generación de nuevas políticas urbanas a nivel nacional. Estas políticas buscan, como punto más importante, promover un desarrollo del transporte urbano sustentable. México se ampara en las agendas y acuerdos internacionales con un gran compromiso para la mejora de la movilidad en la nación. El futuro y el potencial de muchas ciudades mexicanas está en lograr un transporte público y una movilidad seguros. Los lineamientos políticos en esta última década muestran con urgencia la necesidad de implementar normatividades integrales y sustentables unidas a mejoras tecnológicas en materia de movilidad urbana. México ha realizado coordinaciones con Reino Unido en la implementación de proyectos de colaboración para la concientización de gobiernos locales sobre la importancia del desarrollo de ciudades más ecológicas y sustentables. También se ha relacionado en materia de colaboración con el Banco Interamericano de Desarrollo, sumándose a la búsqueda de ciudades más conectadas con el ser humano y que garanticen un transporte sustentable y en armonía con la naturaleza.

Poner al ser humano como centro de la movilidad da un cambio a la configuración de las calles y las carreteras, y a la creación de infraestructuras que buscan mejorar la experiencia de los usuarios de la vía en cualquiera de sus formas.

La movilidad siempre ha sido usada como indicador del nivel de vida de ciudadanos y países en general. Ya que, dependiendo del poder adquisitivo de los

ciudadanos, podrán decidir con mayor o menor facilidad el transporte que usarán para movilizarse. Por esto, la movilidad toma un papel importante desde el punto de vista geopolítico y social; tiene que ser una prioridad para la nación el garantizar a los sectores vulnerables de la población, para disminuir la marginalidad y la desigualdad social, permitiendo a la mayoría el acceso a servicios básicos.

El acceso al bienestar general de todas las personas, en muchos casos depende de la movilidad, ya que niños, niñas, jóvenes y mujeres adultas, en su mayoría, llegan a estos sitios en condiciones difíciles.

Se estima que aproximadamente 103 millones de personas se mueven en las ciudades mexicanas diariamente.

Consultando las encuestas realizadas por INEGI, en el año 2015, en México existen 32'663,342 de personas que se trasladan diariamente para asistir a un centro de estudio. Mientras que las personas que deben trasladarse para asistir a un centro laboral son 40'620,746.

Analizando la Figura 1.1, donde se aprecia la composición porcentual de las personas que se trasladan a su centro de estudio, tenemos que 54.88 % del total de los que asiste a un centro de estudio lo realizan caminando; realizan el viaje usando transporte público como taxi, autobús, combi o colectivo, 25.58 %; el 17.51 % corresponde a los que se trasladan en vehículos privado y el resto con un valor de 1.5 % en bicicleta.

En el caso de las personas que van a laborar la composición, se aprecia en la Figura 1.1, donde se observa que 34.66 % de las personas realizan su traslado usando taxi, combi, autobús o colectivo; el 27.67 % en vehículos privados; un grupo considerable que ocupa 22.63 % realiza el traslado a pie; mientras que el resto lo hace en bicicletas (5.41 por ciento).

Figura 1.1. Proporción modal de personas que se trasladan a su centro laboral

Nota. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de "Anatomía de la movilidad en México. Hacia donde vamos." Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), 07 de diciembre de 2018.

De la gráfica anterior, se deduce que el sector poblacional que se dirige a centros de estudio es más propenso a ir caminando, ya que más de la mitad de ellos se traslada de esta forma. Esto se debe a varias causas, fundamentalmente a que los estudiantes pueden elegir con más facilidad centros de estudios relativamente cercanos a su hogar.

Según los datos analizados, se deduce que hay un gran porcentaje de las personas conectadas a actividades diarias que se trasladan caminando o emplean el transporte público. Pero el problema de mayor envergadura radica en los vehículos particulares, los cuales cada año aumentan su uso y el número que circula en la nación, es cada vez mayor. Aun con el aumento del transporte privado, de las personas que se trasladan diariamente en México, aproximadamente, la mitad lo hace usando el transporte público y 30 % lo realiza caminando.

De la superficie urbanizada en México, 40 % de la infraestructura está destinada al transporte público mediante vehículos motorizados. El gobierno invierte gran cantidad de recursos en mantenimiento y mejora de la infraestructura vial para facilitar la movilidad del transporte público. Por esa razón, se

debe trabajar en sistemas de movilidad que tengan como base al ser humano y busquen la sustentabilidad del transporte. La no consideración de la sustentabilidad y la protección al ambiente provoca daños severos a la salud humana.

Si hablamos de la zona metropolitana del Valle de México, según la encuesta del INEGI Origen-Destino de 2017, se realizan 34.5 millones de viajes diarios, con el empleo de variados medios de transporte. Aunque los preferidos y más frecuentes son los medios de transporte considerados de baja capacidad, también llamados colectivos, que ocupan 51 % de los viajes. En segundo lugar, están los viajes a pie con 32 % y, por último, un 21 % realiza los viajes con el uso de automóviles.

Teniendo en consideración que las políticas en México van en busca de una movilidad sustentable y menos nociva para la salud humana, lo que se pretende es disminuir paulatinamente los transportes colectivos e incrementar el uso de los masivos.

Cuando hablamos de trasportes públicos podemos establecer dos grandes grupos para la región: los colectivos y los masivos. Los colectivos son de baja capacidad, operados bajo el modelo hombre-camión, con alta emisión de gases contaminantes, tecnologías obsoletas, formas de pago convencionales y poca implementación de tecnologías inteligentes. Mientras que la tendencia de los transportes masivos (metro, metrobús, trolebús, mexibús, etc.), poseen buena autonomía de combustible, usan combustibles alternativos en algunos casos, tienen implementadas tecnologías modernas e inteligentes de acceso y pago del servicio, poseen baja emisión de gases contaminantes y, por tanto, tienen una operación más formal y sustentable.

De acuerdo con la misma encuesta (INEGI, 2017), en la zona metropolitana del Valle de México, 50.9 % de los viajes diarios se realiza usando transportes públicos, cifra nada despreciable. De este porcentaje, solo 18 % se hace en transportes masivos, por lo que se considera bajo con respecto a 32.9 % que representan los viajes en colectivos de baja capacidad.

En la actualidad, México busca mover a las instituciones para lograr cambiar el rumbo en materia de movilidad urbana sustentable. Se desea garantizar un incremento de los recursos federales en lo que se refiere a proyectos de movilidad urbana sustentable. Las nuevas tendencias implementadas buscan

incentivar que se generen políticas públicas locales que impulsen el cambio a medios de transporte sustentable y que vayan dirigidas a concientizar a los usuarios en el uso de transportes no motorizados y públicos (SEDATU, 2018).

La Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU) en 2014 elaboró y mostró la Estrategia Nacional de Movilidad Urbana Sustentable (EMUS). Esta estrategia se enfoca en establecer los métodos y dar sustento técnico, jurídico y político para incentivar la aplicación de una movilidad más sustentable.

De acuerdo con datos presentados por la SEDATU, 34 % de las entidades federativas presenta avances en mayor o menor cuantía en la inclusión de la EMUS en sus disposiciones para la movilidad. En la Figura 1.2 se muestra el mapa de la República mexicana que señala las entidades que poseen más de 70 % de avances en materia de movilidad sustentable. Los estados que presentan mayor progreso en la aplicación del concepto MUS (Movimiento Urbano Sustentable), fueron Colima y la Ciudad de México. Presentaron menor avance Tlaxcala y Yucatán, en donde casi es nula la presentación de disposiciones legales en este sentido (SEDATU, 2018).

Figura 1.2. Entidades que poseen más de 70 % de avances en materia de movilidad sustentable



Nota. Fuente: "Anatomía de la movilidad en México. Hacia dónde vamos." Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), 07 de diciembre de 2018.

La movilidad urbana para 2030

Según SEDATU (2018), se estima un aumento en el uso de vehículos automotores con un incremento de 34.5 % en los próximos años con base en que, a finales del año 2017 existían en el país 30'696,542 automóviles, previendo así un total de 41'276,777 vehículos registrados para 2030. Esto arrojará una estadística para 2030 de 20.9 % de los viajes a la escuela en automóvil y para los que se dirigen a sus centros laborales sería de 30.1 por ciento.

Según SEDATU (2018), en el año 2030, si se logra aumentar el presupuesto de movilidad designado al transporte público en al menos 5 %, tendremos que 31 % de los viajes a centros de estudio y 40.3 % de los viajes al centro de trabajo, se realizarán empleando el transporte público en general.

Las tendencias de gasto público presentadas por el IPDP en 2015 arrojaron la siguiente distribución en proyectos de movilidad:

- 47 % para infraestructura vial
- 33 % para pavimentación
- 6 % para transporte público
- 1 % para infraestructura ciclista;
- 7 % para espacio público
- 5 % para movilidad peatonal

El objetivo que persigue la SEDATU con su estrategia para 2030 es llegar a la distribución siguiente:

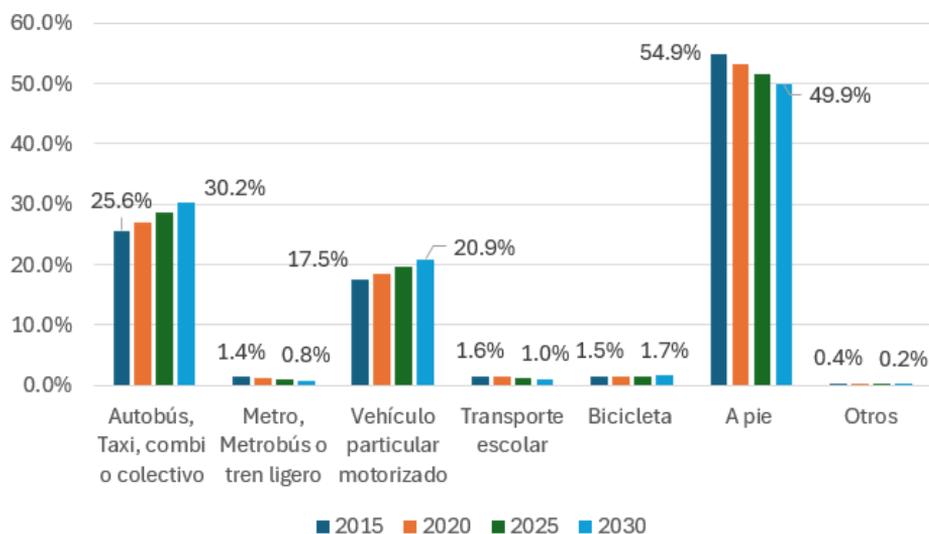
Se dedicará 41 % para infraestructura vial;

- 37 % para pavimentación
- 7 % para transporte público
- 2 % para infraestructura ciclista
- 4 % para espacio público
- 5 % para movilidad peatonal

Según la estimación con base en los gastos públicos, consideran que en el año 2030, las personas que acuden a centros de estudio, 1.7 % irá en bicicleta y 49.9 % lo hará a pie.

En la Figura 1.3 se muestra un gráfico de barra que permite realizar una comparación exhaustiva de la estimación del traslado de los usuarios desde 2015-2030 (valores porcentuales de los años 2015 y 2030), donde se aprecia la siguiente tasa de cambio por medio de transporte: autobús, taxi, combi o colectivo, de 4.6 %; metro, metrobús o tren ligero, -0.5 %; vehículo particular motorizado, 3.3 %; transporte escolar, -0.5 %; bicicleta, 0.2 %; a pie, -0.5 %; otros, -0.3 por ciento.

Figura 1.3. Estimación del traslado de los usuarios del año 2025 y 2030, y comparación con los años 2015, 2020

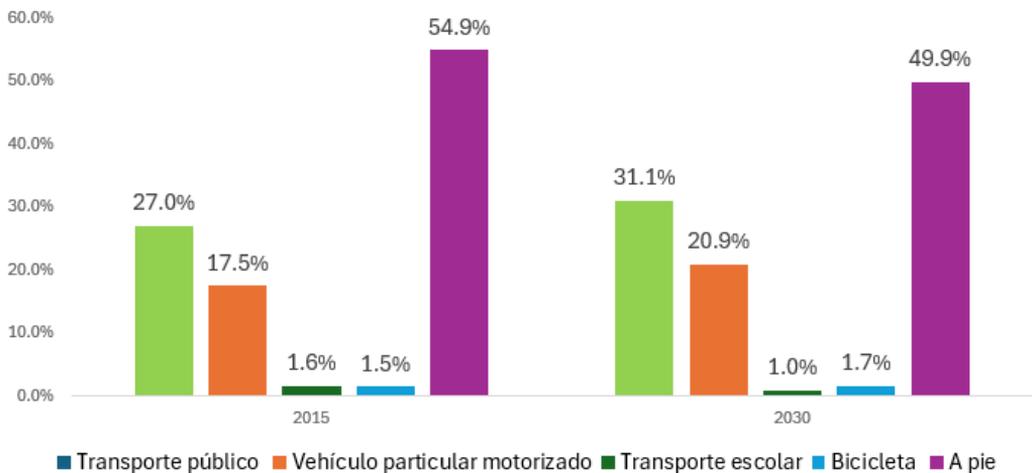


Nota. Estimaciones elaboradas con datos del Registro Público Vehicular y la Encuesta Anual de Transporte 2018, del INEGI. Fuentes: Adaptada de "Anatomía de la movilidad en México. Hacia dónde vamos." Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), 07 de diciembre de 2018.

En la gráfica de la Figura 1.4, se muestra la estimación para 2030 de la población de tres años y más que asiste a centros de estudio y a su lugar de trabajo por medio de transporte. Se puede observar que en el año 2015, el

valor máximo lo alcanzó el sector de las personas que viajaron a pie con 54.9 %, y el menor valor fue para las personas que se trasladaron en bicicleta con 1.5 %. Para el caso del año 2030, se estima como tendencia, que también será mayor el sector de las personas que se trasladarán a pie con un 49.9 % y en menor medida se trasladarán en transporte escolar y en bicicletas con 1 % y 1.7 %, respectivamente.

Figura 1.4. Comparación entre los que se trasladan a centros de estudio o trabajo en 2015 y los estimados para 2030



Nota. En la presente gráfica, a los traslados en autobús, taxi o colectivo se les agregan los viajes en sistemas masivos de transporte (metro, BRT o tren ligero) para que quede una sola categoría denominada "transporte público". Fuente: Adaptada de "Anatomía de la movilidad en México. Hacia dónde vamos." Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), 07 de diciembre de 2018.

Los datos analizados en esta sección nos llevan a la conclusión de que, en los próximos años, en la República mexicana, mantener las actuales tendencias de movilidad, los cambios en favor del progreso, el beneficio y la calidad de los habitantes, será poco perceptible.

Capítulo 2

Elementos de la Ingeniería de Tránsito



Generalidades

Los elementos principales de la Ingeniería de Tránsito son tres y son los responsables de un sinnúmero de fenómenos, interacciones y problemas que se dan dentro de esta área. Dichos elementos son: el usuario, la vía y el vehículo. Cada uno de ellos juega un papel que puede ser descrito y analizado.

El usuario

Este elemento tiene una gran carga dentro del tránsito, ya que el usuario no es más que la persona, por ser sujeto de la acción y puede considerarse como el principal elemento porque ocupa diferentes roles, dependiendo de su posición y circunstancia, ya sea como conductor de un vehículo, pasajero de un vehículo, o como peatón en el momento en que hace uso de la vía sin estar incorporado a un vehículo. Los usuarios pueden ser activos o inactivos, siendo los pasajeros los considerados inactivos, ya que su rol es pasivo y sus decisiones dentro del flujo de tránsito son muy limitadas, ocupando un papel casi nulo, por lo que su estudio carece de sentido en esta ciencia. El usuario toma su papel protagónico en el tránsito cuando funge como conductor, ciclista o peatón.

EL USUARIO COMO CONDUCTOR

Se le conoce como conductor al usuario que ejerce como operador de un vehículo automotor en circulación por una carretera (Figura 2.1).

Figura 2.1. Usuario como conductor de vehículo



Fuente: Autores.

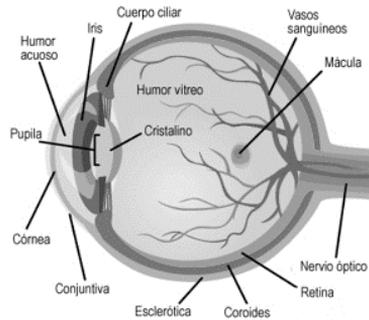
Cuando el usuario está ejerciendo como conductor de un vehículo, aumenta su responsabilidad y más aún si este es un vehículo automotor, ya que en sus manos y en su experiencia está en juego la vida y la integridad física de otros usuarios de la vía. Un conductor debe tener pericia, estar en pleno uso de sus facultades mentales, tener buena condición física y ser capaz de reaccionar ante situaciones complejas que pueden darse en el tránsito. Se estima que el tiempo de reacción normal de un conductor debe estar entre 0.5 y 2.5 segundos.

Visión

La vista es uno de los sentidos que ayuda al conductor a interactuar con su entorno y gran parte de las decisiones tomadas por los conductores dependen de su visión. En la Figura 2.2, se muestra la anatomía básica del ojo humano, que es la base del sentido de la visión. La conducción es inviable sin el correcto funcionamiento del sentido de la vista, el cual depende del trabajo

del ojo, que transforma la energía lumínica en una señal eléctrica. Esta señal eléctrica se mueve hasta el cerebro a través del nervio óptico como conducto de transmisión.

Figura 2.2. Estructura básica del ojo humano



Fuente: Autores.

Normalmente, una persona solo tiene la capacidad de visualizar o tener en su esquema de visión un entorno de 180°. Este rango de visión del ser humano no le permite ver detalles en toda su amplitud, siendo básicamente en un ángulo más estrecho donde se pueden distinguir los detalles. El ángulo donde el ser humano distingue con claridad los detalles es conocido como ángulo central de visión periférica, que está en el rango, para un ser humano normal, de entre 120 y 160°.

Partiendo de lo antes mencionado, en la conducción juega un papel importante el concepto de reacción, que se refiere a la acción que realiza el conductor a causa de un estímulo determinado o emite su respuesta ante una acción concreta.

La reacción llevada a términos de conducción dentro de la Ingeniería de Tránsito se puede evaluar y analizar mediante la cuantificación de una serie de tiempos y distancias.

Al conceptualizar, podemos decir que la distancia de detención es el recorrido que realiza el vehículo desde que el conductor detecta un problema en

la vía, hasta que logra detenerlo completamente. Como sabemos, este proceso es complejo a nivel biológico; el ojo como órgano detecta algún peligro y envía una señal al cerebro, el cual la procesa y toma una decisión que es enviada en forma de señal a los músculos para realizar acciones concretas en función de la detención del vehículo.

En lo que este fenómeno biológico ocurre, sucede un intervalo corto de tiempo que se traduce en el desplazamiento del vehículo, donde aparecen la distancia de percepción y la de reacción. En este periodo de tiempo transcurre el proceso conocido como *PIEV* (Percepción, Intelección, Emoción y Volición), que se definen a continuación.

Percepción: A partir de un estímulo exterior, nuestros sentidos experimentan una impresión material. Básicamente es la recepción de forma sensorial de la información. En la conducción vehicular, la percepción ocurre desde que aparece un objeto en la vía, hasta que es reconocido por el conductor mediante el sentido de la visión.

Intelección: En palabras simples, es el proceso por el cual el conductor puede entender o concebir la situación percibida mediante sus sentidos.

Emoción: Después del proceso de entendimiento comienza una respuesta involuntaria del organismo para prepararse para la acción. Es la modificación del ánimo a partir de determinada percepción y el entendimiento de la situación. En este justo momento empiezan a ser importantes la experiencia y el conocimiento del conductor para tomar la decisión correcta y evitar el peligro.

Volición: Es el acto por el cual se toma acción en favor de una solución. Es el proceso mediante el cual se concreta una acción a partir de una previa decisión.

Distancia de detención

Como la distancia de detención está asociada a un intervalo transcurrido, podemos analizar este fenómeno en función del tiempo, donde aparece el *tiempo de detención* (t_D), que es el tiempo que demora el vehículo en recorrer la distancia de detención.

La distancia de detención está compuesta por la suma de la distancia de percepción, la distancia de reacción y la distancia de frenado. De igual manera, el tiempo de detención es la suma del tiempo de percepción, el tiempo de reacción y el tiempo de frenado.

Se puede realizar una unión de estos aspectos que se denomina tiempo de percepción-reacción (t_{PR}) o tiempo del proceso PIEV (t_{PIEV}). El tiempo de percepción-reacción, según AASHTO (2004), para el caso de estimación de distancias de detención en situaciones de presencia de obstáculos, es de 2.5 segundos; aunque se estima que el tiempo del proceso PIEV puede variar entre 0.5 y 4 segundos. Cabe destacar que durante este tiempo no suele haber modificación en la velocidad o la aceleración del vehículo.

Distancia de reacción

La distancia de reacción (D_R) se define como aquella en la que se desplaza el vehículo desde que el conductor observa determinada situación en la vía hasta el momento en que inicia acciones para detenerse. Por supuesto, la distancia de detención está asociada a un tiempo transcurrido, el cual se conoce como *tiempo de reacción* (t_R) y se define como el tiempo en que el vehículo recorre la distancia de reacción.

Durante el tiempo o distancia de frenado, el vehículo mantiene su estado de movimiento sin alteraciones en la velocidad o en la aceleración. En conductores principiantes, el tiempo de reacción puede ser mayor, pero en conductores con experiencia y en condiciones normales, el tiempo de reacción suele ser de 1 (un) segundo. El tiempo varía en función de disímiles factores, entre los que destacan la experiencia y el estado psicológico del conductor; el cual puede ser afectado por cansancio, fatiga o el consumo de alguna sustancia o bebidas alcohólicas.

Distancia de frenado

La distancia de frenado (D_F) es la que recorre el vehículo, desde que el conductor acciona el freno hasta que logra detenerlo por completo. Y el tiempo que demora el vehículo en desplazarse sobre la distancia de frenado se conoce como *tiempo de frenado* (t_F).

La distancia de frenado, en mayor medida, va a depender del estado técnico, el tipo de vehículo, la superficie de rodadura, las condiciones y el tipo de neumáticos, las condiciones climáticas y, en mayor medida, de la velocidad a la que se circula en el momento del frenado repentino.

La inclinación o pendiente por donde circula el vehículo influye en la distancia de frenado, y dependiendo también, si es ascendente o descendente y

del valor de la pendiente. Con neumáticos o sistemas de frenos que no estén en estado óptimo, la distancia y el tiempo de frenado se prolongan. El peso del vehículo o su carga incidirán en la distancia y el tiempo de frenado, con un aumento de ambos en la medida que aumenta el peso del vehículo. No podemos descartar la influencia de la experiencia y la sagacidad del conductor para lograr reducir la distancia de frenado.

Metodología para determinar la distancia y tiempo de detención

La distancia de detención (D_T) se determina a partir de la expresión siguiente:

$$D_T = D_P + D_R + D_F$$

donde:

D_P - distancia de percepción

D_R - distancia de reacción

D_F - distancia de frenado

La distancia de reacción es calculada mediante la ecuación siguiente:

$$D_R = \frac{v \cdot 1000}{t(3600)}$$

donde:

v - velocidad del vehículo en km/h

t - tiempo que demora en reaccionar el conductor en segundos

La distancia de frenado (D_F) se calcula mediante:

$$F = \frac{v_1^2}{2 \cdot g \cdot f_i}$$

donde:

v_1 - velocidad del vehículo en m/s

g - aceleración de la gravedad

f_i - coeficiente de fricción longitudinal, el cual depende de la interacción neumático-superficie de rodadura; en la Tabla 2.1, se muestran algunos valores de este coeficiente dependiendo de las condiciones de la superficie.

Se puede obtener la distancia de frenado (D_F) usando un ajuste de la ecuación quedando de la forma siguiente:

$$D_F = \frac{v_1^2}{254(f_i)}$$

Tabla 2.1. Coeficiente de adherencia para condiciones de pavimento

Superficie	Seco	Húmedo
Asfalto nuevo	0.85	0.60
Asfalto viejo	0.7	0.55
Asfalto resbaladizo	0.55	0.35
Concreto nuevo	0.85	0.55
Concreto viejo	0.7	0.55
Empedrado limpio	0.60	0.40
Rígido	0.65	0.65
Tierra dura	0.65	0.40

Fuente: Adaptado de: *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*, Cal et al., (2007), México.

La distancia de percepción-reacción

La distancia de percepción-reacción de forma conjunta se determina como:

$$D_{PR} = D_P + D_R$$

Para movimiento uniforme y de forma general con fines de la determinación de la distancia de detención se obtiene mediante la expresión:

$$D_{PR} = v_{veh}(t_{PIEV})$$

Introduciendo la velocidad del vehículo (v_{veh}) en km/h y el t_{PIEV} de valor 2.5 segundos, obtenemos la D_{PR} en metros mediante las conversiones necesarias, quedando finalmente la expresión:

$$D_{PR} = 0.694(v_{veh})$$

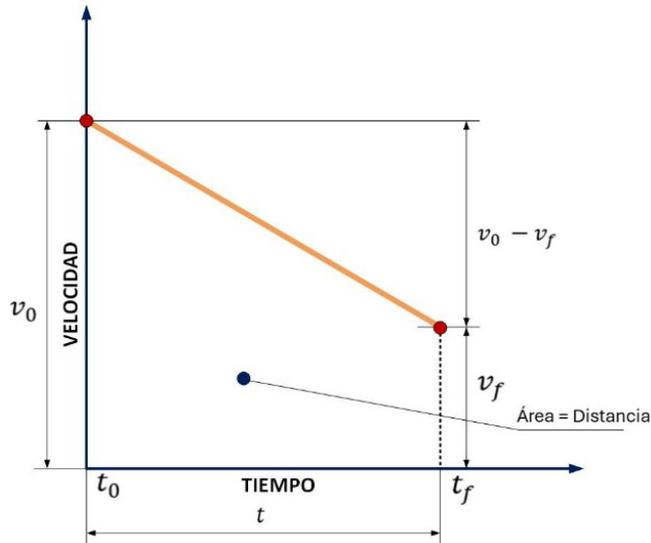
considerando que la potencia de frenado está basada en las características técnicas de los sistemas de freno del vehículo y la fricción longitudinal entre los neumáticos y la superficie del pavimento.

Un vehículo con el motor desengranado y sin usar sistema de frenado va perdiendo velocidad mediante un proceso de desaceleración a causa de la resistencia al rodamiento y al aire.

Un vehículo con el motor engranado y sin usar sistema de frenado va perdiendo velocidad mediante un proceso de desaceleración a causa de la resistencia al rodamiento, al aire y al propio motor. Para el proceso anterior, con el motor engranado y sin accionar los frenos, se estima que para velocidades del vehículo de 110 km/h, la variación es de 3.5 km/h/s. A una velocidad de 30 km/h se experimenta una variación de 1.4 km/h/s.

En la Figura 2.3, se muestra la gráfica del movimiento uniformemente desacelerado y su relación entre la velocidad y el tiempo de frenado.

Figura 2.3. Movimiento desacelerado y su relación velocidad entre tiempo



Fuente: Adaptado de "Relaciones entre la velocidad, el tiempo y la distancia, en movimiento uniforme desacelerado", en Cal *et al.* (2007), *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*, p. 60, México.

Y esto nos llevaría a la siguiente fórmula para la determinación de la distancia de detención (D_T)

$$D_T = 0.694(v_{veh}) + \frac{v_{veh}^2}{254(f_i)}$$

Estos cálculos pueden ser amparados por la Tabla 2.2, que permite obtener valores típicos para diferentes velocidades de proyecto, en condiciones de pavimentos húmedos y en una vía con pendiente nula.

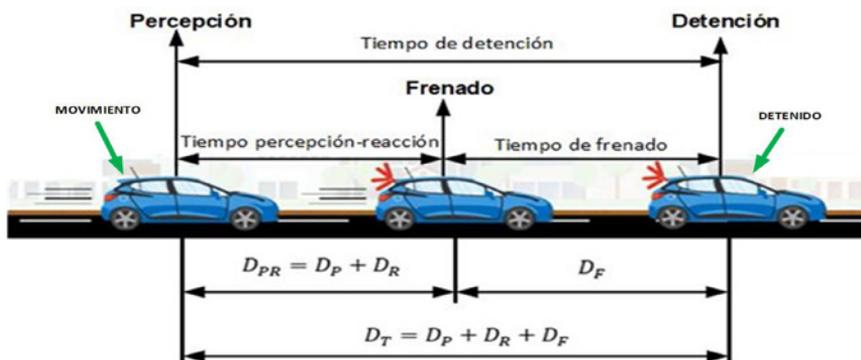
Tabla 2.2. Distancia de detención para pavimento mojado con pendiente nula

Velocidad de proyecto, km/h	Percepción-reacción		Coeficiente de fricción longitudinal (f_i)	Distancia de frenado (D_F), m	Distancia de detención (D_T), m	
	Tiempo	Distancia, m			Calculada	Proyecto
30	2.5	20.8	0.400	8.9	29.7	30
40	2.5	27.8	0.380	16.6	44.4	45
50	2.5	34.7	0.360	27.3	62.0	60
60	2.5	41.6	0.340	41.7	83.3	85
70	2.5	48.6	0.325	59.4	108.0	110
80	2.5	55.5	0.310	81.3	136.8	135
90	2.5	62.5	0.305	104.6	167.1	165
100	2.5	69.4	0.300	131.2	200.6	200
110	2.5	76.3	0.295	161.5	237.8	240
120	2.5	83.3	0.290	195.5	278.8	280

Fuente: Adaptado de: Distancia de parada en pavimento mojado y a nivel, de *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*, Cal et al., (2007), p. 63. México.

La descripción completa del proceso se muestra en la Figura 2.4, donde se aprecia una escala espacial y otra temporal.

Figura 2.4 Composición de los tiempos y distancias de detención



Fuente: Adaptado de: "Distancia para detener un vehículo", en Cal et al. (2007), p. 58.

EL USUARIO COMO CICLISTA

Los ciclistas están en una categoría diferente a los conductores porque por razones de seguridad y características de movimiento, son muy diferentes. Por esa razón, suele prohibirse o limitarse su circulación en algunas carreteras, y se crean vías especiales para el movimiento de volúmenes mayores de ciclistas denominadas, ciclovías.

Se denomina ciclista, dentro de la Ingeniería de Tránsito, a la persona que se moviliza haciendo uso de la vía pública empleando una bicicleta, ya sea con fines recreativos o como medio de transporte (Figura 2.5).

Figura 2.5. Usuario como ciclista



Fuente: *Manual del ciclista urbano de la Ciudad de México* (2011), p. 20.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha determinado que, en los países más industrializados, el sedentarismo y la poca realización de actividad física es una de las causas de muerte más frecuentes, por la aparición de múltiples enfermedades que pudieran evitarse. Por lo que se considera que promover el uso de las bicicletas como práctica de actividad física y como medio de

transporte, es una alternativa que favorece no solo la movilidad y la conservación del medio ambiente, sino también la salud y la calidad de vida (WHO, 2002.)

Promover el uso de las bicicletas en las ciudades como alternativa de transporte requiere una inversión notable, pero comparada con los beneficios que proporciona es totalmente sustentable, además de que disponer de una infraestructura para este medio de transporte es una fuente de empleos directos. El ejemplo está en el modelo implementado en Wisconsin en los Estados Unidos de América; este estado pertenece a la región del medio oeste del país, donde el ciclismo genera más de 556 millones de dólares y 3,400 empleos directos. Esto se logró con el aumento del turismo para ciclistas, el mercado local en la producción, la venta minorista y el mantenimiento de bicicletas. Asimismo, en la ciudad de Portland, ciudad del estado de Oregon, en el noroeste de Estados Unidos, llegó a generar ganancias de 90 millones de dólares (Rajé & Saffrey, 2015).

Según la Oficina del Censo de Estados Unidos y la Encuesta sobre la Comunidad Estadounidense, 2008-2012, solo 1 % de los estadounidenses considera el uso de la bicicleta para moverse a sus lugares de empleo. También la misma fuente confirma que el uso de la bicicleta es más frecuente entre los jóvenes que están en el rango de edad que va de los 16 a los 24 años. La misma fuente confirma que es más frecuente el uso por los hombres que por las mujeres, con un valor de 0.8 % para los hombres y un 0.3 % para las mujeres.

La campaña para disminuir el uso de los vehículos en las grandes ciudades ya es una tendencia mundial. Londres comenzó una campaña con el fin de promover el uso alternativo de la bicicleta y la disminución del uso de automotores con la estrategia llamada *The Mayor's Transport Strategy*. Esta estrategia ha sido muy satisfactoria, ya que ha logrado mantener espacios seguros para el uso de la bicicleta, aumentando su uso en el centro de Londres (TFL, 2017).

EL USUARIO COMO PEATÓN

El peatón es el usuario que se desplaza a pie u ocupa una parte de la vía sin estar posicionado en un vehículo (Figura 2.6).

Figura 2.6. Usuario como peatón



Fuente: Autores.

La dificultad con los peatones radica en que su movilidad es poco predecible y manifiestan un comportamiento muy variado respecto a su trayectoria y al respeto por las normativas en comparación con los conductores de vehículos. La influencia del peatón en la vía se ve disminuida en las zonas rurales, aumentando su importancia y su influencia en el tránsito cuando están en zonas urbanas o cerca de las ciudades. El peatón afecta las condiciones de movilidad y circulación en las ciudades y más en lugares densamente poblados. Los peatones han recibido diferentes clasificaciones debido a que, a pesar de desplazarse en la vía a pie, bien lo hacen de forma o fines distintos y existen cinco tipos de peatones:

Personas con discapacidad

Son aquellas que, por razones congénitas o adquiridas, tienen una o más limitaciones: física, mental, sensorial o intelectual; y esta puede ser permanente o transitoria. Al establecer su interacción con el medio social, existan barreras que constituyen un impedimento para su inclusión plena y efectiva. En consecuencia, con lo que plantea la Ley General para la Inclusión de Personas con Discapacidad, estos peatones deben ser considerados en los proyectos de diseño vial para facilitar su inclusión, eliminando las barreras y los obstáculos que les impiden hacer uso adecuado del espacio público.

El sector poblacional de personas con discapacidad es vulnerable en cuanto a los derechos de movilidad y esto se debe a las escasas políticas públicas centradas en beneficio de este sector.

La Ley General para la Inclusión de las Personas con Discapacidad trata de establecer y promover el mayor número de medidas para la protección y la seguridad de las personas con discapacidad. Defiende los derechos humanos y las libertades fundamentales de todas las personas que presentan algún tipo de discapacidad, favoreciendo su inclusión social. La ley también persigue el objetivo de: "Impulsar la adopción de acciones afirmativas orientadas a evitar y compensar las desventajas de una persona con discapacidad para participar plenamente en la vida política, económica, social y cultural" (DOF, 2011).

En cuanto a la accesibilidad en diferentes infraestructuras, el acceso, la subida y el descenso de transportes públicos y cuestiones referidas al desplazamiento, en general queda mucho por hacer. Lo anterior se evidencia con la Encuesta Nacional de Discriminación del año 2017, la que arrojó que 31.1 % de las personas con algún tipo de discapacidad no logra la inclusión plena y se le dificulta la movilidad por calles, instalaciones y transportes inadecuados. Según el Consejo Nacional para Prevenir la Discriminación (CONAPRED, 2017), en el año 2014, el censo arrojó un total de 120 millones de mexicanos, y de ellos, 7.1 millón tenían algún tipo de discapacidad (INEGI, 2014).

Niños y niñas en la vía pública

En el diseño de zonas urbanas, avenidas, carreteras y otras vías, las niñas y los niños son escasamente considerados, a menos de que se trate de parques o zonas de esparcimiento infantil (Figura 2.7). Pero sucede que las niñas y los ni-

ños también circulan por otras áreas y debe tenerse cuidado en cada aspecto del diseño de las ciudades. Hay que tener consciencia de que ellos ven a una escala menor todo su entorno y su capacidad de protección y respuesta ante una amenaza es diferente.

Figura 2.7. Menores en la vía pública



Fuente: Autores.

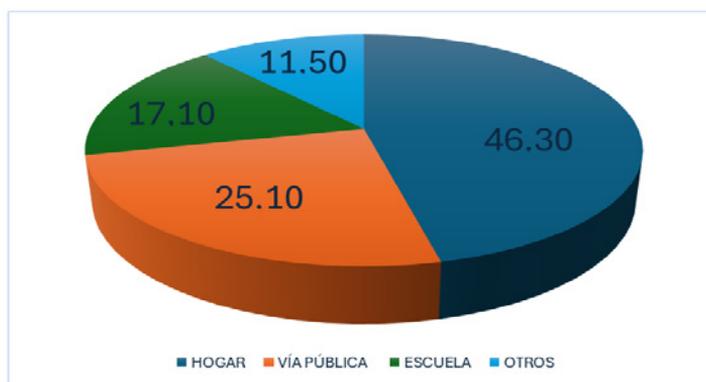
La Ley General de los Derechos de Niñas, Niños y Adolescencia (LGDNNA) establece el derecho a la protección y al disfrute de una excelente salud para todas las personas del sector involucrado (LGDNNA, 2024).

A partir del análisis de la información publicada por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), con base en las Encuestas Nacionales de Salud y Nutrición Continua (ENSANUT, 2022), se tienen los datos siguientes: En el año 2022, en México, estuvieron involucrados en accidentes 712 mil niños y niñas que no pasaban de nueve años, esto arroja un porcentaje de 3.3 %. Estas cifras no son nuevas, en el año 2018 se experimentó el mismo valor y en el año 2021 fue muy cercano, con un valor de 3.4 %. Por lo que este tipo de accidentes

(lesiones de tránsito) para el rango de edades de cinco a nueve años, en México alcanzan 10.6 % del total de todos los accidentes ocurridos en el año 2022.

También se sabe que, en uno de cada cuatro accidentes ocurridos en vía pública, se ven afectados los niños y niñas de cero a nueve años. Llevando la información a una gráfica de ocurrencia de accidentes infantiles en la vía pública podemos decir que 25.1 % de los accidentes antes mencionados, ocurrieron en esta área en el año 2022 (Figura 2.8).

Figura 2.8. Lugar de ocurrencia de accidentes infantiles en México en el año 2022



Fuente: Adaptado de "Lugares donde sufrió accidente la población de 0 a 9 años en México" [gráfica], por Salud, ENSANUT Continua, (2022). <https://blog.derechosinfancia.org.mx/2023/06/28/accidentes-de-la-ninez-en-mexico-2022/>

Accidentes viales y su incidencia en menores de edad

Según los datos publicados por el INEGI (2020), se registró la pérdida de la vida de 783 niños que no llegaban a los 14 años, involucrados en accidentes viales; esto arroja el dato promedio de dos fallecimientos de niñas, niños y adolescentes cada 24 horas en accidentes de tránsito. La información obtenida permite también saber la forma en que viajaban los que perdieron la vida. Como ocupante de vehículo, 136; ocupante de autobuses, 9; peatones, 188; ciclistas, 2; motociclistas, 64; no especificados, 382.

Una de las soluciones que pueden ser viables para reducir el número de niños que pierden la vida en accidentes o son lesionados de forma grave, es modificar el reglamento de tránsito para obligar al uso de los Sistemas de Retención Infantil conocidos como SRI, para niños de hasta 1.5 m de estatura. También debe especificarse que el uso de estos sistemas se ha certificado y homologado. Esto se debe a que la OMS, en el año 2015, informó que solo 53 países tienen establecida una norma técnica para regular el uso de los SRI, sabiéndose que México no cuenta con dichas normas. Hacer uso de algunas normas técnicas como la FMVSS 213 de los Estados Unidos, UNECE R44 (ONU), UNECE R129 (ONU), UN R129, UN R44, y buscar la introducción paulatina de los anclajes ISOFIX, ya sean en el SRI o en el vehículo, donde se puede apoyar en la norma UN 145 o la norma UN 14, garantiza al mayor nivel posible, la seguridad de los niños, las niñas y los adolescentes en la vía y disminuye el número de accidentes donde se vean involucrados; esto debe ser una prioridad para todos los miembros de la sociedad y, en especial, de la familia.

Peatones en edad activa

Existen algunas clasificaciones dentro de los peatones en edad activa dividiéndose por género, ya que se entiende que varían las necesidades a la hora de caminar en la zona urbana. Pero, para efectos del contenido de este capítulo se englobarán solo en estas categorías. Aunque en cuestiones de seguridad existen subgrupos en esta categoría que son más o menos vulnerables, y por esta razón existen muchas políticas públicas dirigidas a garantizar la seguridad en vías y carreteras para grupos de personas en esta situación.

Se plantea que, para el caso de los hombres que han tenido una mayor participación en el diseño de los modelos urbanísticos actuales, sus necesidades como peatones se ven satisfechas en mayor medida, aunque de igual manera el poder mejorar los diseños de las ciudades para lograr satisfacer las necesidades de la mayoría es una prioridad en la mayoría de los países del mundo.

Adulto mayor

El adulto mayor realiza muchas veces trabajos informales o sale a realizar compras y pago de servicios. Otras veces deben salir solos sin compañía de otros miembros del hogar para asistir a consultas médicas y controles de salud.

Según algunas encuestas realizadas, los adultos mayores realizan viajes frecuentes, por lo que se mueven por rutas conocidas; aun así, por sus condiciones físicas y por su edad, suelen aparecer enfermedades degenerativas o que afectan la memoria, por lo que el transporte público puede resultar agresivo y no cumplir con las exigencias de su edad. Por esto, muchas veces necesitan del apoyo de otros transeúntes para el abordaje del transporte y dentro del vehículo, varios de estos carecen de lugares de apoyo. En fin, podemos decir que la infraestructura actual es deficiente para cumplir con las exigencias para cubrir las necesidades de los adultos mayores en la vía.

Como pasajero

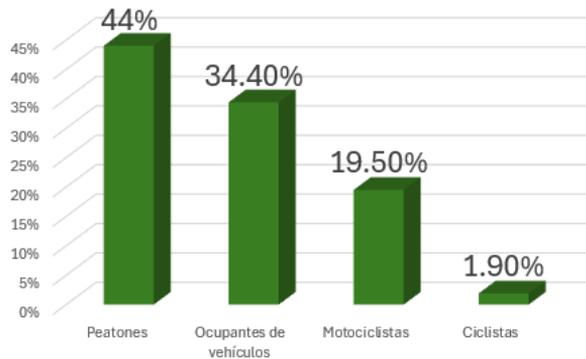
El pasajero es todo individuo que está ocupando un vehículo sin ser el conductor. Entre las leyes establecidas en el tránsito, algunas son alusivas a los pasajeros, en las que se establecen ciertas obligaciones que se deben cumplir. Si un pasajero incumple cualesquiera de las normativas establecidas para ellos dentro de un vehículo, podría ser sancionado por las autoridades competentes. Ejemplo de estas leyes que aplican a pasajeros está el uso del casco en motocicletas o el cinturón de seguridad en autos. Otras leyes están relacionadas con el comportamiento y las normas al usar servicios públicos de transporte.

De forma general, cuando focalizamos al usuario de la vía pública como ser humano, hay que ver los efectos negativos que la movilidad provoca en la sociedad. Según el Informe sobre la Seguridad de Accidentes, emitido por el Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (CONAPRA), se pierden más de 16 mil vidas por año. Estas víctimas, en su mayoría, son personas vulnerables y en este grupo se incluyen las personas con discapacidad.

En la Figura 2.9 se muestra el porcentaje de personas fallecidas en accidentes en la vía, que alcanzó una cifra estimada de 19,536 defunciones en el año 2020. Se aprecia que el mayor porcentaje de decesos por accidentes viales está en la categoría de peatones, con 44 %. Lamentablemente, 65.4 % del total de los decesos ocurridos en las vialidades es de personas vulnerables. Las personas más vulnerables son los niños y las niñas que no sobrepasan los cinco años de edad, y las personas que sobrepasan los 60 años. En el caso del porcentaje particular de los motociclistas fallecidos en accidentes viales, que

es de 19.5 %, como se aprecia en la gráfica, está ocupado en su mayoría por adultos entre 20 y 39 años.

Figura 2.9. Defunciones de usuarios en las vías de México, año 2020



Fuente: Adaptado de *Informes sobre seguridad vial, México 2017*. Secretaría de Salud/Stconapra, Ciudad de México, (2018).

La Vía

GENERALIDADES

La vía es la infraestructura elemental encargada de generar la conexión terrestre para el desplazamiento de los usuarios entre origen y destino, haciendo posible el movimiento de personas, bienes y servicios y garantizando la posible realización de las actividades fundamentales de una sociedad.

CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS VIALES

Las infraestructuras viales poseen varias clasificaciones. Según su propiedad, pueden ser públicas o privadas.

Las vías públicas

Son aquellas que están a titularidad pública y pueden ser usadas tanto por vehículos como por peatones sin ningún tipo de restricciones. Las vías públicas en la República mexicana son la mayoría; su regulación y uso depende de las leyes públicas vigentes y del titular de la vía.

Algunas vialidades públicas pueden ser usadas de forma privada: Son en las que, para su utilización, se deben cumplir ciertos requisitos, autorizaciones o normas. Es el caso de las autopistas, donde se requiere un pago de peaje para acceder; o el caso exclusivo de los que acceden para realizar mantenimientos o reparaciones.

Las vías privadas

Estas vías son solo usadas por sus propietarios o personal autorizado. Los propietarios de estas vialidades son los que determinan las normas para su uso. Por lo general, están asociadas a terrenos o parcelas privadas o son el medio de conexión entre ellas, o conectan viviendas dentro de una zona privada.

Existen vías privadas que son usadas de forma pública; en este caso, el titular establece normas que deben estar regidas por las normas generales del tráfico. En esta categoría están las vías internas de un centro comercial, sus estacionamientos o algunos otros estacionamientos en zonas privadas. También las calles de algunas zonas privadas o de urbanización como cerradas y fraccionamientos.

Carreteras y autopistas

Los tipos de vías existentes pueden ser muy variados; para el caso de los caminos, su clasificación se puede agrupar en dos grandes categorías: las carreteras y las autopistas. Muchos libros de texto y manuales consideran ambas como sinónimos porque muchas veces no son claras sus diferencias. Entre sus diferencias, una fundamental radica en su estructura y los componentes de su construcción.

Según el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), las autopistas son una modificación de las carreteras que poseen el mayor estándar geométrico y, en la medida que aumentan su ancho, aumenta la seguridad al circular por ellas.

Las autopistas para ser catalogadas en México de tipo AP, deben: poseer dos sentidos de circulación con un separador central, que el acceso a las mismas sea controlado, poseer más de un carril de circulación en cada sentido, y tener la capacidad de circulación vehicular superior a 80 km/h y hasta 110 km/h. Un parámetro también empleado para clasificar este tipo de vías es el TPA (Tránsito Promedio Anual) que debe oscilar entre 3 mil y 5 mil vehículos. También es notoria en autopistas la no presencia de semáforos y cruces a nivel.

Para el caso de las carreteras, el INEGI considera que son corredores no exclusivos que permiten la comunicación entre ciudades, fronteras y puertos marítimos. El acceso a las mismas puede ser libre o no, y pertenecen al gobierno federal o pueden ser estatales.

Clasificación de las vías según su condición geográfica

Es notorio que la diferencia entre los diversos tipos de vías se basa en las características entre ellas: si son o no vías rápidas, si son arterias secundarias o alimentadoras, según el número de carriles y si tienen o no control de acceso. También se pueden caracterizar las vías según su condición geográfica y las propias características intrínsecas de la infraestructura vial, como:

- *Urbana*: Son todas aquellas vías que se encuentran dentro de una población. La velocidad permitida de circulación puede ser muy variada, dependiendo del país o la región, pero por lo general la velocidad máxima permitida es de aproximadamente 50 km/h.
- *Travesía*: Son vías que atraviesan un poblado, pero su inicio o fin está fuera de la región comprendida por ese poblado. Este tipo de vialidad se rige bajo las mismas normas de las carreteras urbanas.
- *Interurbana*: Esta vía es encargada de la conexión entre dos poblados. Estas tienen la característica de ser diseñadas para recorrer grandes distancias y, por lo general, son públicas. Dentro de estas vías se encuentran las siguientes:

- *Autopistas*: Son amplias y poseen varios carriles en ambos sentidos de circulación, los cuales se separan con una mediana para disminuir los daños que puedan ocasionarse con la salida de un vehículo de la carretera; esta medida es necesaria en este tipo de carreteras, ya que los vehículos pueden circular a altas velocidades pudiendo llegar hasta 120 km/h, según las normativas del país o región. Las autopistas poseen pasos y cruces para entrada y salida, estos nunca conectan directamente a zonas pobladas. Las autopistas son parte de la red federal de carreteras y pueden ser de acceso restringido, por lo que para circular por ellas es preciso realizar un pago de cuota.
- *Autovías*: Este tipo de carreteras son muy similares a las autopistas, permiten también alcanzar los 120 km/h. Su diferencia radica en que estas sí tienen cruces o pasos que conducen directamente a vivienda o zonas pobladas colindantes. Las autovías no disponen de peajes y tienen calzadas independientes para cada sentido de circulación.
- *Rurales*: Estas vías se caracterizan por una baja densidad vial o poblacional, por lo que es bajo el volumen de tránsito y se encarga de conectar pueblos y localidades pequeñas. Son vías de acceso a bienes y servicios de poblaciones rurales. Por lo general, el desplazamiento por vías rurales es para los sectores agrícola, minero y forestal, garantizando su conexión con rutas de mayor importancia o centros de comercio local.

México se caracteriza por tener una red nacional de carreteras perteneciente a Caminos y Puentes Federales de la SCT, la cual comunica a la mayor cantidad de regiones y comunidades de la República mexicana con 836,603 km de vías, conformadas por autopistas, carreteras, caminos rurales y brechas que conforman la gran red vial de la nación.

La numeración para las carreteras en la República mexicana se establece de oeste a este, y de norte a sur, siendo pares e impares, respectivamente, iniciando en Tijuana, Baja California y subiendo la numeración en la medida que nos movemos al sur y al este.

Según la SCT, la clasificación de la red carretera en México se caracteriza por tres grandes grupos: Red Federal de Carreteras, Redes Estatales, Caminos Rurales y Brechas Mejoradas.

La Red Federal de Carreteras soporta el mayor tráfico de usuarios y el gobierno federal se encarga de su mantenimiento y cuidado. Estas vías canalizan los recorridos destinados al comercio exterior, por lo que son de largas distancias, moviendo al sector económico más importante de la nación.

Las Redes Estatales tienen su mayor importancia en establecer conexiones regionales, ya que enlazan las zonas de producción agropecuaria, permitiendo llevar la producción a zonas industriales y a mercados locales. Y están presentes en muchas regiones del país conectando áreas muy grandes entre sí.

Los Caminos Rurales y Brechas, son vialidades que no están pavimentadas, de dimensiones cortas y con poca importancia económica. La importancia de estas vías está en el sector social, ya que garantiza a pequeños asentamientos la comunicación con sectores básicos, como salud y educación. Por esta razón, estas vías son de mucho interés para las pequeñas comunidades, ya que garantizan el nivel de vida de los pobladores y la funcionalidad de estas comunidades.

Según SICT, las carreteras en México se dividen en cinco categorías de clasificación oficial, estas categorías se establecen con letras o su combinación. La clasificación oficial cobra importancia para los conductores de vehículos y, en especial, para los de transporte de carga porque son una guía de las vías a las cuales pueden acceder según las características de los vehículos.

CATEGORÍAS DE CLASIFICACIÓN OFICIAL

- ET y A: En este tipo de vías se permite la circulación a cualquier vehículo, ya que tiene excelentes condiciones físicas, grandes características dimensionales para el desplazamiento seguro.
- B: Se consideran redes primarias y están destinadas a la comunicación interestatal, siendo también vías importantes para apoyar en la vinculación del tránsito, mejorando la movilidad en varias zonas.
- C: En este grupo están las redes secundarias que se conocen como carreteras estatales y logran conectar a los vehículos con la red primaria. Estas vías tienen longitudes medias, no son de gran tamaño.
- D: Esta es la red alimentadora que se enmarca en un servicio municipal y es el medio de conexión a la red secundaria, por lo que presenta una longitud relativamente corta.

A continuación, se muestra la Tabla 2.3, la tipificación de las carreteras de acuerdo con sus características geométricas y nomenclatura:

Tabla 2.3. Tipificación de carreteras

TIPO DE CARRETERA	CANTIDAD DE CARRILES	NOMENCLATURA
Eje de Transporte	Cuatro	ET4
Eje de Transporte	Dos	ET2
Autopistas	Cuatro	A4
Autopistas	Dos	A2
Red Primaria	Cuatro	B4
Red Primaria	Dos	B2
Red Secundaria	Dos	C
Red Alimentadora	Dos	D

Fuente: Autores.

Según datos del INEGI y en colaboración con la SCT, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), publicados con la actualización 2020 de la Red Nacional de Caminos (RNC), comunicado de prensa núm. 643/20, del 15 de diciembre de 2020, la Red Nacional de Caminos de la República mexicana se extiende por 802,573.60 km de carreteras, caminos rurales y veredas, integrando 292,447 localidades y 1,261 plazas de cobro.

Como información de interés nacional, hay 174,779.81 km de carreteras, 527,345.62 km de caminos rurales, 21,989.98 km de veredas y 78,458.18 km de vialidades para sumar 802,573.60 km totales.

Componentes de las vías

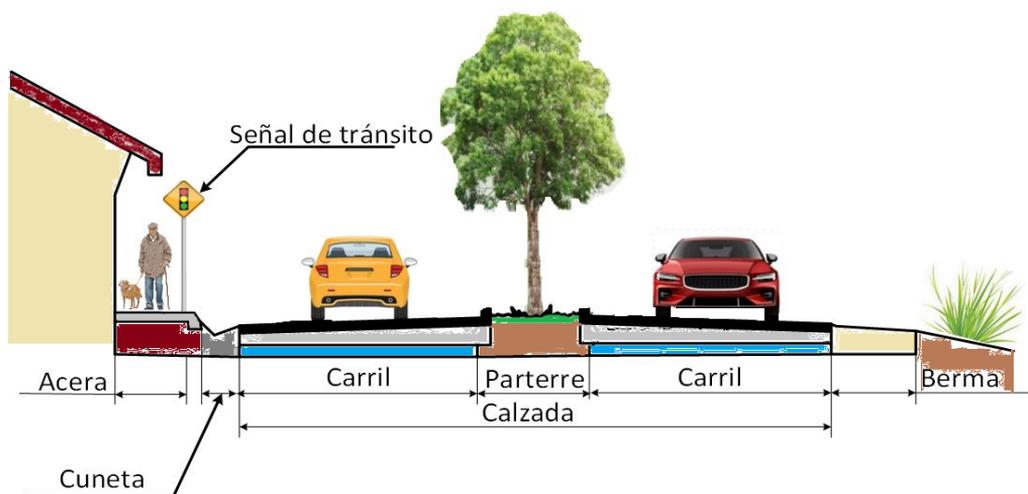
Las vías y carreteras están compuestas por diferentes elementos (Figura 2.10), los cuales hacen referencia a características geométricas, constructivas y de funcionalidad. Dentro de los que destacan:

- *Calzada*: Es toda el área que forma parte de la vía pública y que se destina específicamente para la circulación de los medios de transporte (vehículos) y está delimitada por la banqueta. La misma está formada por diferentes carriles de acuerdo con su tipo.
- *Carril*: Es la subdivisión de la calzada y se caracteriza por permitir la circulación de una sola línea de vehículos, uno detrás de otro, en cada carril. Los carriles se dividen visualmente mediante el empleo de marcas longitudinales en la superficie de la calzada. De acuerdo con la posición de los carriles respecto al centro de la calzada, se les da cierta prioridad de circulación. Más a la izquierda (al centro de la calzada) se consideran carriles de aceleración; más a la derecha (al borde) se consideran de deceleración.
- *Acera o banqueta*: Es la parte de la vía exclusiva y reservada para el movimiento de los peatones como usuarios prioritarios.
- *Cuneta*: Es la zanja a los lados de la calzada, entre la calzada y la acera o a los bordes de la calzada con la finalidad de atraer el agua superficial para el rápido drenaje y evacuación de la calzada.
- *Berma o Espaldón*: Espacio al lado derecho de determinada vía, con la finalidad de mejorar la visibilidad de los usuarios; permite la circulación de peatones en ausencia de aceras y garantiza un espacio seguro para paradas inesperadas de vehículos o por emergencias, sin que esto constituya una interrupción en el tránsito regular.
- *Bordillo*: Un elemento separador o delimitador de la calzada para establecer hasta dónde llega la misma.
- *Intersecciones*: Zona donde se interceptan dos o más vías y es un lugar que permite el cambio de dirección de los vehículos.
- *Parterre*: Esta zona también es conocida como isla de seguridad central, se ve con más frecuencia en vías urbanas con alto flujo vehicular. Sirve para encauzar la circulación de vehículos y como refugio de los peatones antes del cruce de determinada avenida en ausencia de pasos peatonales.
- *Señalización de tránsito*: Son elementos muy variados usados en la vía pública para conceder información y regulaciones a conductores, pasajeros y peatones. Estas pueden ser preventivas, restrictivas e informa-

tivas, y pueden ser clasificadas en horizontales y verticales. Pueden ser elementos estructurales, carteles informativos, avisos lumínicos o sonoros, símbolos con el objetivo de garantizar el cumplimiento de normas y regular el tránsito.

- *Parada de transporte público*: Espacio reservado para que los usuarios de los servicios del transporte público asciendan y desciendan de los diferentes medios de transporte.

Figura 2.10. Partes componentes de una vía de un carril por sentido



Nota. Fuente: Elaboración propia.

CLASIFICACIÓN OROGRÁFICA DE LAS VÍAS

Esta clasificación está determinada por el relieve del terreno, tomando en cuenta la inclinación o la pendiente de determinado tramo de la carretera con respecto a la horizontal. Las categorías de las clasificaciones orográficas se muestran en la Tabla 2.4 donde, para terrenos escarpados se experimenta la máxima inclinación por encima de 25.

Tabla 2.4. Clasificación orográfica según el tipo de terreno

Tipo de terreno	Pendiente del terreno transversal a la carretera	Máxima inclinación (i)
Plano / llano	Menores de 5 %	$i \leq 5$
Ondulado	De 6 a 12 %	$5 < i \leq 15$
Accidentado/ montañoso	De 13 a 40 %	$15 < i \leq 25$
Muy accidentado/escarpado	Mayor a 40 %	$25 < i$

Fuente: Autores.

Vehículos

El vehículo es el medio de transporte que utiliza el usuario para circular por las vialidades y carreteras. En la actualidad se dividen en no motorizados y motorizados.

En el siguiente capítulo se busca poder ilustrar al lector acerca de la importancia dentro de la Ingeniería de Tránsito de conocer las características como el peso y las dimensiones de los vehículos para así, relacionarlas con las clasificaciones oficiales de las carreteras para comparar resultados y con base en las normas vigentes conocer las limitaciones de circulación de los vehículos. Aquí detallaremos las normativas de peso y las dimensiones máximas permitidas para los vehículos de autotransporte que se encuentren transitando en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal. Las dimensiones básicas de los vehículos que poseen un marcado interés para la Ingeniería de Transporte son alto, ancho y largo. La distancia entre ejes se considera para determinar algunos parámetros en la construcción de infraestructuras viales. Otro factor que posee importancia en el área de estudio es el peso bruto de los vehículos (PBV).

El siguiente análisis se realiza con base en el Diario Oficial de la Federación (DOF): 26/12/2017 y la NOM-012-SCT-2-2017. Esta norma relaciona las especificaciones de peso y las dimensiones permitidas de los vehículos de autotransporte para la circulación en vías de jurisdicción federal.

CLASIFICACIÓN VEHICULAR

Los vehículos tienen muy variadas clasificaciones:

- Por la función que realizan pueden ser clasificados como de pasajeros o de carga.
- Por el peso se clasifican en ligeros o pesados.
- Por el régimen de propiedad se clasifican en particulares o comerciales.
- Por su configuración se clasifican en unitarios o articulados.

También los vehículos se clasifican, según su uso y tamaño, en autos (A), autobuses (B) y camiones (C). En el caso de los vehículos de carga como los de clasificación B y C se usa una clasificación más específica.

Cabe destacar que la letra C es usada para designar solo camiones unitarios. En el caso de camiones articulados se hace una caracterización más profunda colocando una nomenclatura de mayor complejidad, ya que depende de las unidades que lo forman. Para su mejor entendimiento se deben conocer las unidades que forman los vehículos articulados y las diferentes configuraciones posibles. Para mejor comprensión, a continuación se dan algunas definiciones según las Normas Oficiales Mexicanas.

- *Tractocamión*: Es el vehículo autopropulsado encargado de sostener y arrastrar a los semirremolques.
- *Semirremolque*: Es el vehículo que no posee eje delantero, y por lo general cumple su función de carga de mercancía cuando es acoplado a un tractocamión. Como tiene ausencia de eje delantero parte de su peso cae sobre el tractocamión. La NOM-035-SCT-2-2010 establece las condiciones de los semirremolques para operar en México.
- *Remolque*: Este es un vehículo que no está dotado de propulsión propia y que además posee un eje giratorio, o un semirremolque con convertidor y eje al centro o trasero fijo.
- *Tractocamión articulado*: Es el vehículo que se destina exclusivamente al transporte de carga, está formado por la unión de un tractocamión y con un semirremolque.

- *Tractocamión con doble articulado*: Es el vehículo utilizado exclusivamente para el transporte de carga, y está formado por un tractocamión, un semirremolque y un remolque u otro semirremolque, los cuales están unidos por mecanismos de articulación o un convertidor.

Según su clase o configuración y con base en las normas oficiales y mexicanas se aprecian en la Tabla 2.5 los tipos de vehículos de carga con sus nomenclaturas.

Tabla 2.5. Nomenclatura por configuración de vehículos

Clase de vehículo o configuración	Nomenclatura
Autobús	B
Camión unitario	C
Tractocamión	T
Convertidor	D
Camión remolque	C-R
Tractocamión articulado	T-S
Tractocamión doblemente articulado	T-S-R T-S-S

Fuente: Adaptada de: DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

Una clasificación un poco más amplia se da en los vehículos de acuerdo con su clase, número de ejes y llantas. A cada una de las letras usadas en la clasificación de la tabla anterior, se le adiciona un dígito que hace referencia al número de ejes que dispone cada sección de la unidad. Ejemplo de esto son las unidades conocidas coloquialmente como camión sencillo (C2), el camión rabón (C3), torton (T3S2), tráiler (T3S3) y el conocido como *full trailer* (T3S2R4).

En la Tabla 2.6 se muestra la clasificación de los autobuses por su clase, número de ejes, cantidad de neumáticos o llantas, mostrando su nomenclatura.

Tabla 2.6. Clasificación de los autobuses según su clase

Autobús			
Nomenclatura	No. de ejes	No. de llantas	
B2	2	6	
B3	3	8 o 10	
B4	4	10	
			

Fuente: Adaptada de: DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

En la Tabla 2.7 se muestra la clasificación de los camiones unitarios y en la Tabla 2.8 los camiones remolques según su clase, número de ejes y llantas, mostrando su nomenclatura.

Tabla 2.7. Clasificación de los camiones según su clase

Camión unitario (c)			
Nomenclatura	No. de ejes	No. de llantas	
C2	2	6	
C3	3	8-10	

Fuente: Adaptada de: DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

Tabla 2.8. Clasificación del camión remolque según su clase

Camión-Remolque (C-R)			
Nomenclatura	No. de ejes	No. de llantas	
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

Fuente: Adaptada de: DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

En el caso de los tractocamiones-semirremolques no se les permite la circulación arrastrando un convertidor sin semirremolque enganchado.

CONVERTIDORES

Un convertidor es un sistema para el acoplamiento que se engancha a un semirremolque o para agregarle articulación para el uso de la configuración de carga tractocamiones semirremolques-remolque (T-S-R) y a la (C-R). El convertidor transforma un semirremolque en remolque y debe cumplir con la NOM-035-SCT-2-2010. Existen convertidores con lanza sencilla y que poseen un solo punto de unión, con lanza doble y dos puntos de unión, los cuales son llamados de tipo H y, junto a los denominados de quinta rueda baja, son usados en góndolas o *madrinas*.

Los convertidores son usados en semirremolques y son de una gran importancia, ya que gracias a ellos se pueden crear vehículos articulados con una mayor capacidad de carga, logrando hacer más eficiente las operaciones logísticas.

Los convertidores varían en su forma de uso y pueden ser Tipo A, Tipo H o Tipo c.

Convertidores Tipo A

Los convertidores Tipo A (Figura 2.11), poseen dos ejes no motorizados, una lanza de tracción, un ojillo de enganche, bastidor de acero de alta resistencia en forma de viga con peralte de 4 pulgadas en solera. Poseen un sistema de tracción con lanza y suspensión de 30,000 libras.

Figura 2.11. Convertidor de dos ejes, tipo A



Fuente: Autores.

Convertidores Tipo H

Los convertidores Tipo H (Figura 2.12), están formados por dos ejes, los cuales no son autopropulsados; con dos orificios de enganche, de 25,000 libras de capacidad con acople de disco de 10 birlos. No cuentan con barra de tracción. Poseen viga armada de acero de alta resistencia con $\frac{1}{2}$ pulgada y un patín con espesor de 5 pulgadas. Suspensión y sistema de frenos mediante aire comprimido a 23,000 ó 30,000 libras, con una válvula doble para regular la altura y una quinta rueda.

Figura 2.12. Convertidor de dos ejes, tipo H



Fuente: Autores.

Convertidores Tipo c

Los convertidores Tipo c (Figura 2.13), poseen un eje no motorizado y dos ojillas de enganche. Bastidor con vigas tipo I de 7 1/4 pulgadas de peralte, con alma de placa de 1/4 a 36, lanza de PTR 2 x 3, calibre de 3/16, placa de 5/16 A-36 y dona.

Figura 2.13. Convertidor de eje simple, tipo c



Fuente: Autores.

CLASIFICACIÓN DE LOS TRACTOCAMIONES

En la Tabla 2.9 se muestra la clasificación de los tractocamiones articulados según su clase, número de ejes y llantas, mostrando su nomenclatura.

Tabla 2.9. Clasificación del tracto camiones articulados según su clase

Tractocamión articulado (T-S)			
Nomenclatura	No. de ejes	No. de llantas	
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Fuente: Adaptada de DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

En la Tabla 2.10 aparece la clasificación de los tractocamiones articulados por su clase, número de ejes y cantidad de neumáticos o llantas, mostrando su nomenclatura.

Tabla 2.10. Clasificación tractocamión-semirremolque, según su clase

Tractocamión semirremolque remolque (T-S-R)			
Nomenclatura	No. de ejes	No. de llantas	
T2S2R2	6	22	
T2S1R3	6	22	
T3S1R2	6	22	
T3S1R3	7	26	
T3S2R2	7	26	
T3S2R3	8	30	
T3S2R4	9	34	
T2S2S2	6	22	

Continuación de Tabla

Tractocamión semirremolque remolque (T-S-R)			
Nomenclatura	No. de ejes	No. de llantas	
T3S2S2	7	26	
T3S3S2	8	30	

Fuente: Adaptada de DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

TIPOS DE EJES

Según la norma, las configuraciones de los T-S-R no deberán ser semirremolques y/o remolques de tres ejes si estos son de tipo retráctil. Esta restricción es válida aun cuando el vehículo viaje por debajo del peso bruto autorizado para esta configuración, sin importar que el eje esté suspendido.

Según Budynas & Nisbett (2010), un eje es un elemento constructivo que cumple la función principal de sostener y permitir la rotación de una pieza o conjunto de piezas, fundamentalmente de un piñón o engrane.

En el caso de los vehículos, los ejes de ruedas son componentes del sistema de transmisión y son de gran importancia en la estructura, principalmente en camiones de carga. Un eje de ruedas es una varilla estructural, en dirección transversal, que conecta un par o más de ruedas para transmitirle movimiento y mantener la posición de equilibrio entre sí y con relación al chasis. Las ruedas son casi los únicos elementos del vehículo que entran en contacto con la superficie del suelo mediante la superficie de rodadura. Los ejes son los encargados de soportar todas las cargas, los pesos adicionales, las fuerzas de inercia con sus reacciones en el frenado y aceleración del vehículo. También los ejes se encargan de mantener los neumáticos alineados y paralelos, deben soportar el peso del vehículo y las cargas adicionales, y también pueden cumplir otras funciones dependiendo del modelo del vehículo.

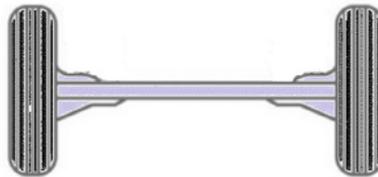
Los ejes de rueda tienen variadas configuraciones que dependen de varios factores, entre ellos, el peso para el cual se diseña el vehículo, las dimensiones y la finalidad.

Los ejes pueden clasificarse atendiendo a si son simples o de grupo. Dentro de los ejes de grupo están:

Eje Simple

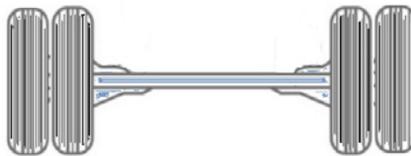
Es el eje que está constituido por un solo elemento y dos neumáticos. El peso recomendado es de 7,000 Kg (Figura 2.14). Para el eje simple, pero de cuatro neumáticos, el peso máximo recomendado es de 11 toneladas (Figura 2.15).

Figura 2.14. Eje simple de dos neumáticos



Fuente: Autores.

Figura 2.15. Eje simple de cuatro neumáticos



Fuente: Autores.

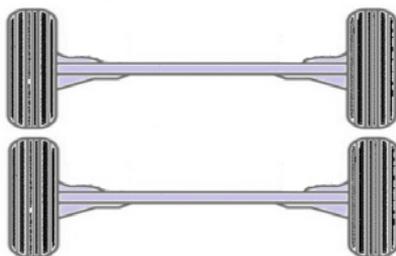
AGRUPACIÓN DE EJES

La agrupación de ejes tiene una forma especial y se separan a distancias menores a los 2 m. La clasificación de los ejes agrupados se describe a continuación:

Eje Tándem

La mayoría de los vehículos de cargas poseen esta configuración. Este elemento está formado por dos ejes articulados conectados al vehículo de forma común (Figura 2.16). La separación entre ejes es de 2.5 m y son encargados de repartir la carga en partes iguales. A su vez, estos ejes pueden ser motrices, portantes o combinados y su peso admisible para el caso de ejes tándem de 4 neumáticos es de 10,000 kg.

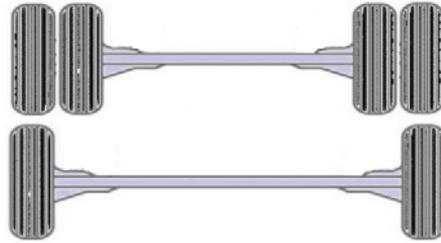
Figura 2.16. Ejes tándem de cuatro neumáticos



Fuente: Autores.

Para el caso de ejes tándem de seis neumáticos, el peso máximo admisible es de 14,000 kg (Figura 2.17).

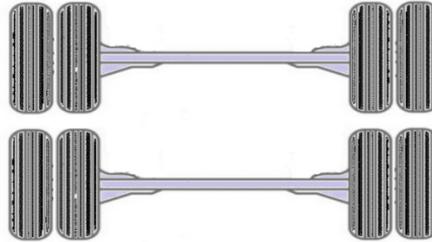
Figura 2.17. Ejes tándem de seis neumáticos



Fuente: Autores.

Para el caso de ejes tándem de 8 neumáticos, el peso máximo admisible es de 18,000 kg (Figura 2.18).

Figura 2.18. Ejes tándem de ocho neumáticos

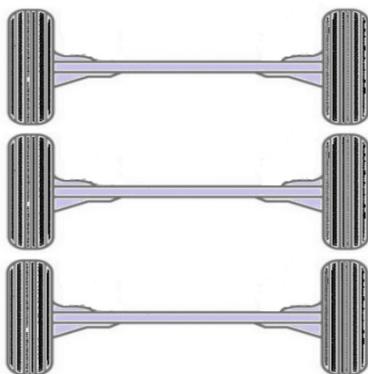


Fuente: Autores.

Eje Trídem

Esta disposición es empleada en vehículos de carga de gran porte, grandes y pesados, que poseen gran capacidad de carga. Estos elementos están formados por tres ejes articulados, unidos al vehículo por estructuras comunes. La separación entre estos ejes es menor a 2.4 m y la carga se reparte de forma uniforme entre los tres ejes. Estos pueden ser motrices, portantes o combinados, y el peso máximo que es aceptado por este tipo de eje de 6 neumáticos es de 17,000 kg (Figura 2.19).

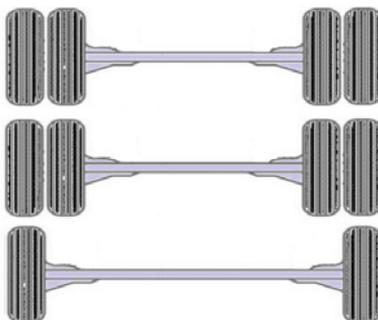
Figura 2.19. Ejes Trídem de seis neumáticos



Fuente: Autores.

Para el caso de eje Trídem de 10 neumáticos, el peso admisible es de 21,000 kg (Figura 2.20).

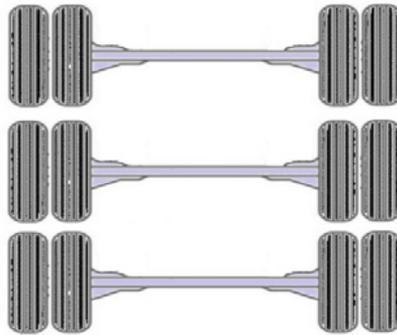
Figura 2.20. Ejes trídem de 10 neumáticos



Fuente: Autores.

Para el caso de eje Trídem de 12 neumáticos, el peso admisible es de 25,000 kg (Figura 2.21).

Figura 2.21. Ejes trídem de 12 neumáticos

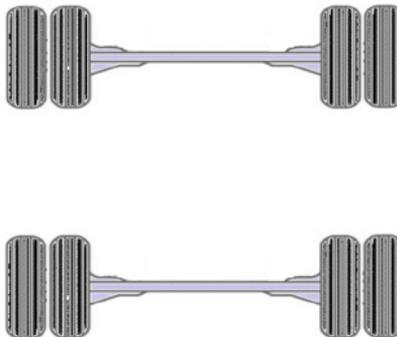


Fuente: autores.

Eje Doble

Estos elementos están formados por la combinación de dos ejes separados por una distancia superior a 2.4 m. Esta configuración soporta un peso máximo de 11 toneladas por eje y posee ocho neumáticos (Figura 2.22).

Figura 2.22. Ejes dobles de ocho neumáticos

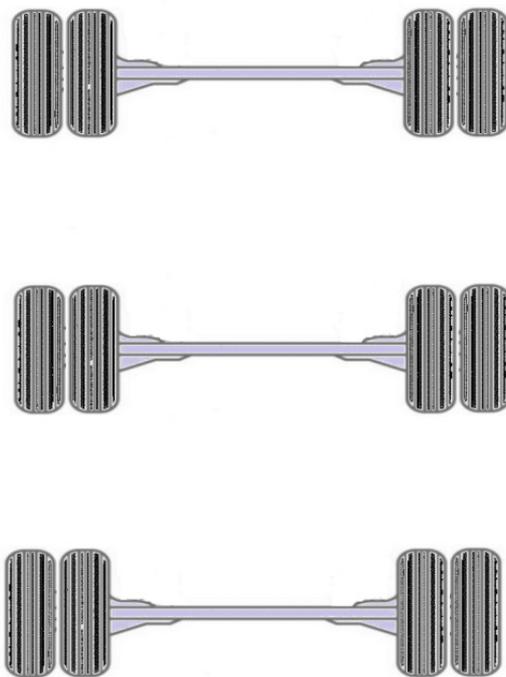


Fuente: Autores.

Eje Triple

Estos elementos están conformados por tres ejes separados por una longitud de 2.4 m; el peso máximo admisible es de 11 toneladas por cada uno de los ejes y en configuración de 12 neumáticos. Se muestra en la Figura 2.23.

Figura 2.23. Configuración de ejes triples de 12 neumáticos

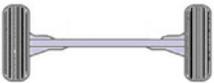


Fuente: Autores.

Otro diseño que también existe es el de ejes triples, que se arman mediante la combinación de un eje tándem y 1 eje simple. La distancia entre los ejes tipo tándem es menor a 2.4 m, y la distancia que lo separa del eje simple es superior a 2.4 m. El eje simple es capaz de soportar 11 toneladas, a diferencia del eje tándem, que soporta 18 toneladas.

Las vías y carreteras de México regulan, mediante normativa el peso máximo por tipo de ejes y el camino por el cual deben circular los diferentes vehículos a nivel nacional. A continuación, mostraremos la Tabla 2.11, con la información para el caso de los autobuses.

Tabla 2.11. Configuración de ejes y tipos de vehículos

Configuración de ejes	Tipo de camino					
	Vehículos	ET4 y ET2 A4 y A2	B4 y B2	C	D	
 	Sencillo 2 llantas	B	6.5	6	5.5	5
 	Motriz sencillo 4 llantas	B	12.5	10.5	9	8
 	Motriz doble tándem 6 llantas	B	17.5	13	11.5	11
 	Motriz doble o tándem 8 llantas	B	21	17	14.5	13.5

Fuente: Adaptada de: DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

La velocidad también es una variable de importancia que debe ser controlada para el correcto funcionamiento de los vehículos de acuerdo con su configuración de ejes y sus características. En la Tabla 2.12, se observan las velocidades máximas permitidas por configuración de vehículo, con la excepción

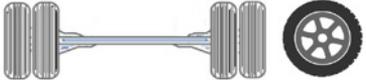
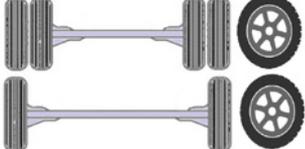
de que las vialidades indiquen una velocidad menor. Mientras que la Tabla 2.13 muestra la configuración de ejes por tipos de vehículos.

Tabla 2.12. Velocidad máxima por carretera, por tipo de vehículo o su configuración vehicular

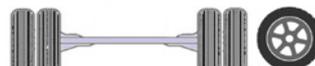
Vehículo o configuración	Velocidad máxima en km/h, por tipo de carrera		
	B	C	D
C	70	60	50
C-R	50	40	30
T-S	60	50	45
T-S-R y T-S-S	50	40	30

Fuente: Adaptada de: DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

Tabla 2.13. Configuración de ejes y tipos de vehículos

Configuración de ejes	Vehículo	ET4 y ET2 A4 y A2	B4 y B2	C	D
	C-R y T-S-R	6.5	6	5.5	5
	C y T-S	6.5	6	5.5	5
	C-R y T-S-R	10	9.5	8	7
	C y T-S	11	9.5	8	7
	C-R y T-S-R	11	10.5	9	8
	C y T-S	12.5	10.5	9	8
	C-R y T-S-R	15	13	11.5	11
	C y T-S	17.5	13	11.5	11

Continuación de Tabla

Configuración de ejes	Vehículo	ET4 y ET2 A4 y A2	B4 y B2	C	D	
	C-R y T-S-R	17	15	13.5	12	
	C y T-S	19	15	13.5	12	
	Motriz doble o tándem 8 llantas	C-R y T-S-R	18	17	14.5	13.5
	C y T-S	21	17	14.5	13.5	
	C-R y T-S-R	23.5	22.5	20	N/A	
	Triple o Tridem 1 2 llantas	C y T-S	26.5	22.5	20	N/A
						

Nota. N/A No Autorizado. Fuente: Adaptada de: DOF: 26/12/2017 bajo la NOM-012-SCT-2-2017.

Capítulo 3

Sistemas Inteligentes de Transporte



La ciencia está vinculada directamente con el desarrollo tecnológico que avanza cada día con mayor rapidez y el área del transporte no es una excepción. Dentro de la ciencia del transporte y la logística, se busca aumentar el conocimiento en favor del desarrollo profesional en el área de carreteras, redes viales y movilidad. La Ingeniería de Tránsito es una ciencia ya constituida, como una rama fundamental de la Ingeniería del Transporte; se especializa en los elementos principales de la vía, el tráfico, la movilidad y algunas variables macroscópicas del tránsito. Esta rama de la ciencia es la encargada también del estudio de flujos vehiculares y peatonales en regiones urbanas, suburbanas y rurales. La Ingeniería de Tránsito está directamente relacionada con la planeación, la elaboración de los proyectos geométricos y la operación del tránsito. Por lo anterior, en la actualidad se han desarrollado SIT (Sistemas Inteligentes de Transporte) o por sus siglas en inglés, ITS (Intelligent Transportation Systems), que no son más que la aplicación de tecnologías y avances científicos avanzados en función del control, administración y monitoreo del tránsito y la movilidad, así como de la gestión de diferentes modos de transporte.

En la actualidad, los SIT son capaces de resolver un sinnúmero de problemas; fundamentalmente están orientados a mejorar las condiciones de circulación vehicular y evitar el congestionamiento. En la actualidad, la congestión vehicular se ha vuelto un problema serio, debido al aumento de la población y de la urbanización. Esta congestión reduce la eficiencia de la infraestructura de transporte e incrementa los tiempos de viaje, el consumo de combustible y la contaminación ambiental (Nkoro y Vershinin, 2014).

Indudablemente, la incorporación de las tecnologías en sistemas de transporte permite un uso racional de las vías y se logra aumentar la eficiencia del transporte, aportando grandes ventajas socioeconómicas. Esto es gracias a que se logra aumentar el control del flujo vehicular, reduciendo los gastos de operación tanto en transporte de pasajeros como de carga. El SIT disminuye el congestionamiento vehicular, aumenta la seguridad vial, existe mayor fluidez en la circulación y logra reducir la emisión de gases contaminantes, haciendo el tráfico más sustentable (Miramontes; Vidaña & Rodríguez, 2015).

El uso de los GPS (Global Positioning Systems), ha permitido implementar un gran número de aplicaciones dentro de los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT). Los GPS combinados con los Sistemas de Información Geográfica (SIG) dan un gran volumen de aplicaciones de mucho beneficio para la mejora de la gestión de la movilidad y el tránsito. El uso de los GPS en combinación con otras tecnologías, en el año 2015 ocupó el segundo lugar entre las calles y avenidas de la CDMX.

Ventajas de los Sistemas Inteligentes de Transporte

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) otorgan grandes beneficios a las ciencias vinculadas al transporte y la movilidad, y se pueden resumir en:

1. Aumento de la eficiencia operativa con optimización de rutas, entrega de mercancías preservando su calidad y cantidad, menores costos de las operaciones logísticas y cadenas de suministro estables.
2. Mejor seguridad vial para conductores, vehículos y mercancías. Detección de amenazas potenciales en la ruta, prevención de accidentes, disminución de asaltos o delitos viales.
3. Conserva el ambiente y permite el desarrollo sostenible y sustentable, con la reducción de la congestión vehicular, el control de emisión de gases contaminantes en los vehículos y la tecnología para la reducción de la contaminación auditiva.

Funciones de los Sistemas Inteligentes de Transporte

Los SIT, en su conjunto, cumplen muchas funciones, como *monitoreo del transporte en tiempo real*, el cual permite extraer información de todos los vehículos

y peatones en la vía. Con esta información se pueden optimizar rutas para acortar el tiempo, ahorrar combustible y enviar a los vehículos por zonas más seguras y con menos riesgos delincuenciales. Existe también un uso en *paneles informativos*, estos son situados en vialidades para mostrar a los conductores información de condiciones viales, condiciones climáticas o niveles de velocidad. El envío de *notificaciones de emergencia* funciona de forma autónoma cuando se detecta una alta tasa de probabilidad accidental. Se envía un mensaje en forma de llamada de emergencia, que es detectada por policías, hospitales o bomberos, según sea el caso. Otra función importante en el tránsito que cumplen los SIT es la de *vigilancia de infracciones*, aumentando la seguridad vial detectando vehículos que circulan por determinados puntos a exceso de velocidad o que cruzan una intercepción con la luz del semáforo en rojo. En el cobro de peajes en carreteras y autopistas está presente el *cobro electrónico de peajes* facilitando el pago a los conductores, reduciendo el tiempo de espera y haciendo rápido el paso por el punto de pago. Entre sus funciones para disminuir el impacto al ambiente provocado por el transporte, están los sistemas que obtienen la información de los tubos de escape de los vehículos para controlar y mitigar las emisiones de dióxido de carbono y otros gases que afectan el planeta. En la Ingeniería de Tránsito es importante analizar y evaluar las vías y hacer ciertas estimaciones del tráfico, cuestión que se ve beneficiada con la implementación de sistemas de conteo de tráfico.

Clasificación de los SIT de acuerdo con sus aplicaciones

Los SIT son una solución viable y sostenible para la calidad de la movilidad y estos se pueden clasificar de acuerdo con sus aplicaciones. Según el ITS (Toolkit for Intelligent Transport Systems for Urban Passenger Transport) preparado por el Banco Mundial como parte del Programa Subsahariano de Políticas de Transporte (SSATP, por sus siglas en inglés - Sub Sahara África Transport Policy Programme), se muestran a continuación las áreas de aplicación y su descripción, tomando en consideración que hay una notable diferencia entre aplicación (parte funcional) y tecnología (The World Bank, 2011; Nasir *et al.*, 2014; OST-R, 2009 y World Road Association, 2004).

GESTIÓN DE OPERACIONES

El área de Gestión de Operaciones (GO) tiene como objetivo monitorear, controlar y supervisar un sistema de transporte, una flota vehicular o a los propios conductores. Esta área permite detectar las emergencias que puedan presentarse para poder ser atendidas en el menor tiempo posible y lograr con esto, la disminución de los costos de operación y el incremento en gran medida de la eficiencia de los sistemas donde se implementen estas áreas de los SIT. También cabe destacar que la gestión de operaciones aplicadas a la carga y descarga de mercancías, es muy provechosa para la optimización de la actividad.

Principales aplicaciones de la GO

Su aplicación principal actualmente está dirigida al despacho asistido de vehículos (Computer-Aided Dispatch) y monitoreo automático de vehículos (Automatic Vehicle Monitoring). También estos sistemas se usan en el monitoreo de las condiciones de algunas rutas, monitoreo de horarios de viajes y entregas, análisis de la conducción para garantizar lo establecido, información en tiempo real de incidentes y emergencias, reprogramación horaria dinámica y monitoreo para verificar el cumplimiento de contratos de servicios.

Tecnologías de la GO más utilizadas

Las tecnologías de la GO se emplean en la localización automática de vehículos, con el fin de encontrar vehículos robados o que han sido usados para cometer algún delito:

- Consola del conductor, para brindar un interfaz dinámico que muestra gran cantidad de información del entorno y del vehículo, mejorando la eficiencia de la conducción.
- Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés - Geographic Information Systems) para optimizar rutas y dar la mejor opción para llegar de origen a destino.
- Botones de pánico, usados por personas en situación de vulnerabilidad o peligro.
- Sensores de velocidad, aceleración y curvas muy cerradas para estudios y recogida de datos que pueden ser usados para nuevos proyectos o la mejora de los ya existentes.

- Software de programación y optimización de recursos para garantizar la disminución de costos de operación.
- Los software de control de flota son muy difundidos y existe una amplia gama con características muy disímiles.

AYUDA AL CONDUCTOR (AC)

El objetivo directo del SIT-AC, como su nombre lo indica, va dirigido al conductor para mejorar la calidad del servicio en su totalidad. Esto se logra con ayuda en la conducción haciéndola más segura y efectiva, disminuye el tiempo de viaje y el consumo de combustible. También la AC es capaz de prevenir accidentes, por lo que aumenta notablemente la seguridad a bordo, no solo del conductor sino también de la mercancía y ayuda en la labor de aparcamiento informando los lugares viables y vacíos para estacionarse.

Principales aplicaciones del AC

La ayuda al conductor mayormente es usada para elaborar informes del tiempo de viaje, tener en tiempo real algunas condiciones técnicas y operativas del vehículo, precisión de acoplamiento en el caso de los autobuses que deben hacer paradas en plataformas para el accenso y descenso de pasajeros. También es usado para recopilar información en tiempo real de las condiciones y las características de vialidades, vigilancia de pasajeros y para informar al conductor de espacios y lugares apropiados para estacionarse. Mediante estas aplicaciones se busca proporcionar asistencia al conductor para lograr mejorar la conducción y hacerla más eficiente.

Tecnologías AC más usadas

- Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés-Global Navigation Satellite System)
- Sistema de información en vehículos (In-Vehicle Information System)
- Sensores de obstáculos
- Alarmas visuales y auditivas
- Sensores magnéticos
- Circuito cerrado de televisión (CCTV)

SISTEMA DE PAGO ELECTRÓNICO

El SIT aplicado al área de Sistema de Pago Electrónico (SPE) permite la recaudación de tarifas en el servicio de transporte público, cobro del uso de vías y estacionamientos. El SPE puede ser programado y ajustado teniendo en cuenta diferentes criterios, como tipo de usuario, tipo de vehículo, zona de ejecución, distancia, entre otros tantos criterios. Esto es ventajoso, ya que garantiza un menor tiempo de acceso, la disminución de costos del recaudador, permite pagos múltiples y, al ser más eficiente el sistema, logra que menos usuarios puedan evadir el pago del servicio.

Principales aplicaciones del SPE

El Sistema Inteligente de Transporte SPE es usado para administrar el precio y la venta de pasajes, el cálculo de tarifas, el control de acceso, la coordinación y la distribución correcta de trasbordos y la gestión de ingresos. También es usado en diferentes cobros por congestión, por contaminación y por estacionamientos.

Tecnologías SPE más usadas

- Cajas de cobro (*farebox*)
- Tarjetas inteligentes y de banda magnética
- Otros medios de pago electrónico como celulares, relojes inteligentes y llaveros con chip electrónico
- Validadores de medios de pago
- Recargadores de medios de pago
- Barreras de control de acceso
- Transpondedores (transmisor/contestador)
- Lectores RFID (Radio Frequency Identification)
- Cámaras ANPR (Automatic Number Plate Recognition)
- Aplicaciones móviles y parquímetros electrónicos

INFORMACIÓN AL VIAJERO

El sistema de Información al Viajero (IV), como su nombre lo indica, se encarga de dar información necesaria a los viajeros o usuarios de vías y transporte público en general. Esto logra hacer más atractivo el transporte público, ayuda a

incentivar a las personas a hacer uso de medios de transporte sustentables, sostenibles y ecológicos. Mediante el sistema IV se garantiza dar instrucciones de interés a los conductores, viajeros, usuarios y pasajeros, como información turística, eventos y condiciones viales, reduciendo los tiempos de espera, los tiempos de desplazamiento y logrando hacer eficientes los trasbordos.

Principales aplicaciones del Sistema de Información al Viajero

La aplicación de este sistema es muy variada, pero tiene un único objetivo, brindar información. Para esto se usa PC o internet, teléfonos inteligentes, en tiempo real mediante las estaciones, terminales. Otras formas de aplicación se hacen mediante información a bordo de los vehículos, anuncios en la vía pública y el uso de servicio de alertas en casos de emergencias de tránsito o siniestros.

Tecnologías de Información al Viajero más usadas

- Sistemas de Información Geográficas (GIS)
- Internet y la Web
- Aplicaciones móviles
- Paneles de información variable
- Sistemas de altavoz
- Sistemas de navegación

GESTIÓN DEL TRÁFICO

La gestión de tráfico (GT) se encarga del monitoreo y el control del tráfico y tiene como objetivos disminuir la congestión vehicular y gestionar el uso adecuado de las vías, situación cada vez más complicada debido al aumento demográfico y la expansión de las ciudades. También ayuda a disminuir las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero. A su vez, hace posible aumentar la seguridad vial e influye en los usuarios de la vía para hacer cumplir las normas de tránsito. Disminuye la ocurrencia de accidentes y los daños ocurridos.

Principales aplicaciones de la GT

La Gestión del Tráfico se usa en el monitoreo continuo de la red vial, para el control de tráfico urbano y también se ha implementado en intercepciones semaforizadas para su coordinación. Existen ejemplos de su uso en peajes urbanos y el control de carriles de alta velocidad, así como en la coordinación de carriles reversibles y pasos a nivel con vías férreas. También son utilizados para la detección de infracciones, accidentes viales y de vehículos que viajan a altas velocidades, violando las normativas. En menor medida, existen casos donde se ha observado el empleo de la GT para informar sobre las condiciones atmosféricas y climáticas que afectan la vía, peligros de colisión y la administración de estacionamientos.

Tecnologías GT más usadas

- Sistemas semafóricos
- Radares de tráfico
- Peanas (base para sensores diversos)
- Transpondedores
- Lectores RFID
- Cámaras ANPR
- CCTV
- Sensores
- Tarjetas inteligentes
- Lectores de tarjetas
- Paneles de información variable

MONITOREO Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

El Monitoreo y Protección Ambiental (MPA), tiene como objetivo implementar herramientas y dispositivos en los vehículos que logren reducir las emisiones de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno, reducir el consumo de combustibles fósiles y aminorar la contaminación sonora en el ambiente.

Principales aplicaciones del MPA

El Sistema Inteligente de Tránsito en el área de monitoreo y protección ambiental se ha implementado en la conducción eficiente, en la gestión y el

control de zonas consideradas de baja emisión, el cobro de impuestos por contaminación y el control del acceso restringido en determinadas áreas de la ciudad. Es muy notable también el uso de este sistema en el control de carriles para carros compartidos (Car sharing/Car Pool).

Tecnologías MPA más usadas

- Sistemas de semáforos adaptativos
- GNSS (Global Navigation Satellite System)
- Sistemas de Información Geográfica (GIS)
- Transpondedores
- Lectores RFID
- Cámaras ANPR
- CCTV
- Radares
- Sensores

SEGURIDAD PÚBLICA

El Sistema de Seguridad Pública (SP) es un conjunto de herramientas y dispositivos implementados con el objetivo de aumentar la seguridad, evitar actos terroristas, prevenir y registrar actos delictivos, reducir la ocurrencia de accidentes y poder enviar asistencia médica y técnica de forma rápida y precisa. Con esto se logra salvar vidas humanas y animales y garantizar la seguridad y la protección de ciudadanos en situación de vulnerabilidad.

Principales aplicaciones del SP

Este sistema se aplica en circunstancias especiales, como dar prioridad a vehículos de emergencia, garantiza el señalar y el priorizar las rutas de evacuación. Este sistema es aplicado con éxito en la evaluación de amenazas en las vialidades, y en la detección y el análisis de vehículos y contenedores sospechosos. Es muy factible en el seguimiento de vehículos de carga, vigilancia a bordo de mercancías peligrosas, así como de terminales, de infraestructuras, de peatones, ciclistas y de las vías y carreteras en general.

Tecnologías sp más usadas

- CCTV
- Cámaras ANPR
- Paneles de información variable
- Localización automática de vehículos
- Aplicaciones móviles
- Sensores
- Sistemas de altavoz

TRANSPORTE POR DEMANDA

El DRT o transporte por demanda, está enfocado en personalizar ciertos servicios garantizando llegar a segmentos especiales y específicos de la población. El DRT adapta el servicio de transporte a la necesidad del cliente. Permite llevar el servicio a áreas de baja demanda, zonas vulnerables y facilitar el uso de determinado sistema de transporte a personas con discapacidad.

Principales aplicaciones del DRT

Este sistema se aplica para garantizar la reservación de algunos servicios por los clientes, para la asignación del servicio a determinado pasajero, y la optimización de rutas de pasajeros o de carga. El DRT es aplicado con eficiencia en llevar el registro de los pasajeros, para conocer los lugares de mayor aglomeración, la cantidad de personas que suben o bajan del transporte público y en qué lugares. En fin, permite controlar, analizar y satisfacer la demanda de determinados servicios.

Tecnologías DRT más usadas

- Software especializado
- Reservas
- Asignación óptima del servicio
- Optimización de rutas
- Pago
- Unidad a bordo

Proyectos de SIT y su área de aplicación en el país

Después de hacer un recuento de la importancia, las ventajas, las funciones y las áreas de aplicación de los SIT, podemos decir que México ha avanzado significativamente en el empleo de estos sistemas para el beneficio de todos los sectores del área de transporte. Al realizar un recuento de algunos de los proyectos de SIT y su área de aplicación en el país, se puede mencionar el Sistema de Pago Electrónico en Gestión del Tráfico.

SISTEMA DE PAGO ELECTRÓNICO EN GESTIÓN DEL TRÁFICO

En México, el sistema de telepeaje es muy usado, ya que facilita las operaciones de cobro de cuota. Al ser electrónico, realiza el pago de forma automática convirtiéndose en un sistema interoperable. El mismo permite instalar un *tag* a bordo de cada vehículo, para acceder a todos los peajes del sistema con una única cuenta de pago. En cada concesionaria está habilitado un sistema de *back office* y un sistema central de gestión y compensación financiera. Las ventajas directas de los SIT para la movilidad son notables, con la mejora en el flujo vehicular en las casetas de cobro y la agilización del tránsito.

SISTEMAS DE PAGOS ELECTRÓNICOS

Existe un sistema integrado de recaudo de transporte público en la Ciudad de México, que facilita a los usuarios acceder al servicio de transporte público con una tarjeta. Estas tarjetas prepagadas permiten usar varios servicios como el metro, el metrobús, el tren y las bicicletas públicas (Ecobici). Este innovador sistema considerado un SIT, posee validadores, puntos de venta y recargas para las tarjetas que porta el usuario. El mismo puede funcionar gracias a la disponibilidad de un sistema central que monitorea, opera y administra las operaciones acompañadas de una cámara de compensación; esta conexión entre sistemas hace posible el cruce de dinero por transacciones interoperables.

GESTIÓN DEL TRÁFICO INFORMACIÓN AL VIAJERO

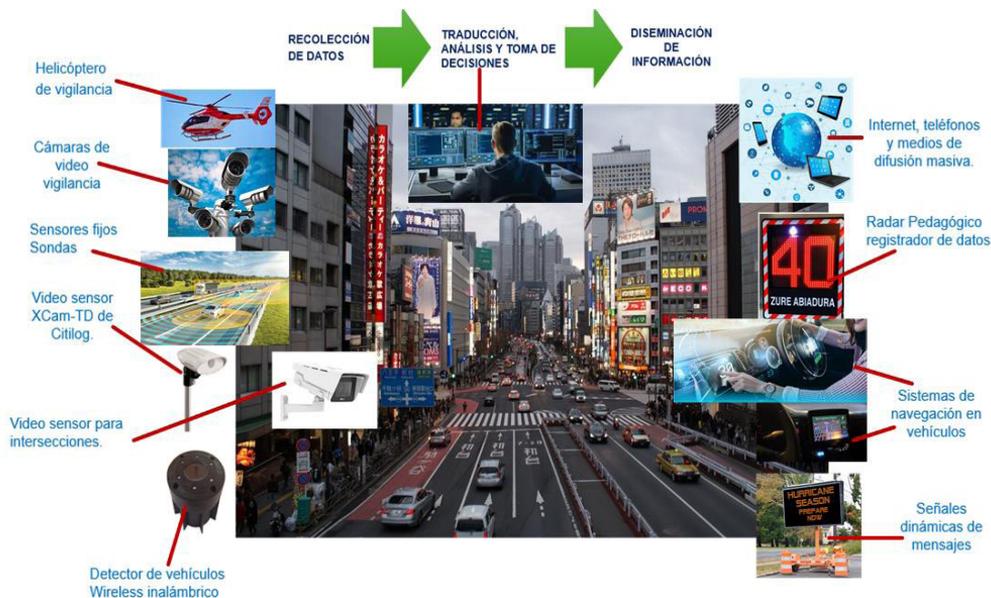
En la autopista Arco Norte de la Ciudad de México, existe un sistema de control de tráfico inteligente que está compuesto por:

- a. Un sistema integrado de monitoreo de las condiciones del flujo vehicular en la autopista, esto lo realiza en tiempo real.
- b. Un sistema de control de incidentes automatizado, que registra la ocurrencia de cualquier acontecimiento, delito u otra eventualidad de riesgo.
- c. Un medio de comunicación electrónico que se actualiza en tiempo real, para ayudar a la mejor circulación y que los conductores tengan la información necesaria.

En la Figura 3.1, se muestra un SIT para la obtención de información en tiempo real y está constituido por tres fases principales: recolección, procesamiento y difusión.

- *Recolección:* En esta fase, se trata de recopilar la información a través de dispositivos y tecnologías que pueden ser cámaras, sensores integrados en las vialidades, sondas móviles y dispositivos para detectar la velocidad de circulación de los vehículos.
- *Procesamiento de información:* Fase en la que generalmente se trabaja con la información recopilada y enviada a un centro de control de información, usando redes de telecomunicación óptica. Con esta información, se procede a realizar acciones como edición, digitalización, análisis, toma de decisión y envío de los resultados.
- *Difusión:* La información procesada por el centro de control es obtenida por los dispositivos y medios de difusión o ejecución. Los medios de ejecución o difusión pueden ser semáforos inteligentes, pantallas digitales para la difusión de cierta información a conductores, pasajeros o peatones. También se difunde la información por internet, televisión o radio, según sea el caso. Toda esta información pasa por las tres fases de manera rápida y precisa, por lo que se considera en tiempo real, por el poco tiempo de ejecución del ciclo (Molina, Zamora, Remess & Lagunes, 2016).

Figura 3.1. Elementos de un SIT en tiempo real



Fuente: Adaptada de "Tecnologías asociadas con sistemas de información de tráfico en tiempo real", en Ezell, (2010).

En la Figura 3.2, se muestra una imagen representativa de los principales Sistemas Inteligentes de Transporte, pero especializada en control del tránsito de forma inalámbrica. Destaca de estas tecnologías, el empleo de la comunicación satelital, la transmisión terrestre mediante antenas, la comunicación intermodal con el empleo de diferentes modos de transporte para soporte tecnológico en el envío y recepción de la señal; etcétera.

Figura 3.2. Redes inalámbricas para el control de tránsito



Fuente: "Todo sobre los ITS, los Sistemas de Transporte Inteligentes." 18 noviembre 2013. <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/todo-sobre-los-its-los-sistemas-de-transporte-inteligentes>

Según Knox (2013), la movilización con el empleo del transporte terrestre es un factor que favorece la economía, ya que permite que la sociedad pueda acceder a los lugares de trabajo, estudio o centros de salud. Sin dejar de considerar que el movimiento de los bienes y mercancías para su llegada al cliente final se efectúa mediante el transporte terrestre en su mayoría.

En la Tabla 3.1, se muestran los elementos básicos de los SIT y cómo estos son usados en la vía pública.

Tabla 3.1. Elementos fundamentales y su uso frecuente de los SIT

SISTEMA	USO
Sistemas de Información Avanzados para Viajeros	Envío de información de tráfico en tiempo real. Guía de ruta mediante sistema de navegación. Sistemas de información para espacios disponibles de estacionamiento. Sistemas de monitoreo del clima en tiempo real.
Sistema Avanzado de Administración del Transporte	Centros de operación del tráfico. Controles modificables de señalética. Mensajes aleatorios y dinámicos en pantallas digitales.
Sistemas de Tarifas de Transporte Habilitados	Los pagos de peaje de forma electrónica. Líneas de expreso. Tarifas para pagos de vehículos por km recorridos. Variabilidad de pago de estacionamiento con monitoreo de tiempo de uso.
Sistemas de Transporte Público Avanzado	Información para los usuarios de las condiciones de determinados transportes públicos (hora de llegada, tiempo de recorrido, retardos, etc.). Localización automática de vehículos. Pago de tarifas electrónicas con tarjetas inteligentes.
Integración vehículo- infraestructura y vehículo- vehículo	Sistemas para evitar colisiones o saturación en intersecciones. Adaptación inteligente de la velocidad límite de algunos tramos de la vía.

Fuente: Adaptado de "Tecnologías asociadas con sistemas de información de tráfico en tiempo real". (Ezell, 2010, p. 8).

Siemens (2014), en su publicación *Soluciones inteligentes para el tráfico de hoy y del mañana*, ejemplifica de manera muy puntual qué se debe hacer o cuál es la solución más eficiente según la situación de las vías y las condiciones del tráfico. En el estudio mencionado, lo que se busca es realizar un control de tráfico optimizado, mediante la implementación de programas de conmutación de semáforos más dinámicos, que mejoren la circulación vehicular disminuyendo los tiempos de espera.

Capítulo 4

Características del tránsito



Generalidades de la Teoría de flujo vehicular

Para su desarrollo político, económico y social, la mayoría de las ciudades del mundo dependen enteramente de la movilidad mediante los diferentes modos de transporte. No se concibe ningún sistema de transporte que pueda operar sin las condiciones previas de infraestructura; de ello se desprende la importancia de las vías férreas, los caminos y las carreteras para que sea posible la movilidad terrestre. La heterogeneidad de los medios de transporte por modo terrestre hace aún más complejo el establecimiento de sistemas de transporte terrestre eficientes y la interacción entre ellos. Para lograr la eficiencia y el correcto funcionamiento de los sistemas y las redes de transporte hay que tener en cuenta un gran número de factores y parámetros, y la relación existente entre ellos.

Según Cal *et al.* (1994), los factores que complican el estudio de la movilidad y el flujo vehicular son:

- La variabilidad y la heterogeneidad de los vehículos que interactúan en un mismo entorno.
- Las diferentes características técnicas de los vehículos que les proporcionan diferentes formas, pesos, velocidades y dimensiones.
- Las características propias de las infraestructuras viales, puentes y pasos peatonales. Con las calles deficientes, angostas, pendientes pronunciadas, aceras insuficientes para el desplazamiento de los peatones y carreteras no actualizadas o construidas con tecnologías obsoletas.

- La poca o deficiente planificación de los proyectos de tránsito y movilidad. En algunos casos, la falta de presupuesto y la intervención de autoridades políticas sin la preparación técnica suficiente, lleva a deficiencias futuras en la infraestructura, a especificaciones de construcción inadecuadas para desempeñar la función que se requiere.
- Proyecciones de intercepciones, pasos a desnivel, puentes, túneles y otras obras con mala concepción y sin elementos técnicos fundamentados. Incorrecta ubicación o establecimiento de zonas residenciales y comerciales.
- Elaboración de proyectos viales sin considerar normas técnicas de sustentabilidad y sostenibilidad.

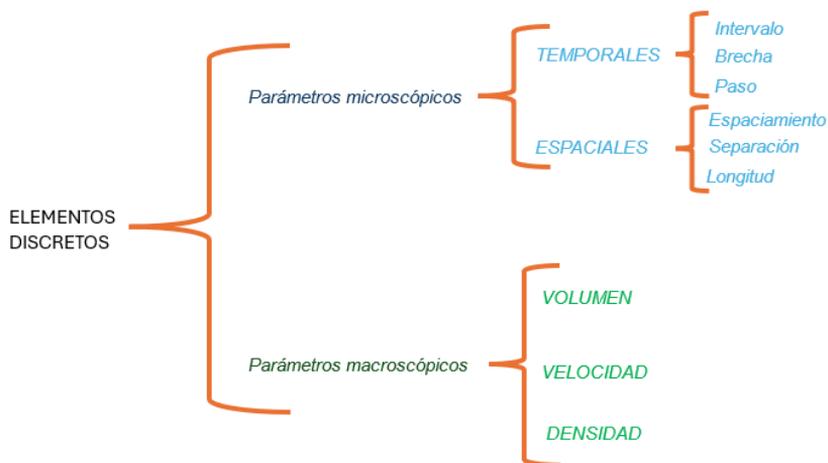
Un factor de interés que influye en la movilidad es la poca o la mucha educación vial de conductores, peatones y pasajeros. Por esta razón, en los últimos tiempos se legisla y se establecen nuevas normativas que contemplan la educación y la concientización de los usuarios con determinadas problemáticas del tránsito.

La circulación en el tránsito puede clasificarse en dos grandes grupos: circulación continua y circulación discontinua.

- *Continua*: No existen elementos fijos de regulación del tránsito externos al flujo del tráfico, que provoquen paradas periódicas.
- *Discontinua*: Existen elementos denominados fijos que causan interrupciones periódicas en el flujo vehicular, como semáforos o algunas señalizaciones que obligan a los vehículos a detenerse.

La corriente vehicular también dispone de elementos discretos que se clasifican por sus parámetros en microscópicos y macroscópicos. En la Figura 4.1, se muestra la relación de los elementos discretos.

Figura 4.1. Elementos directos y sus parámetros



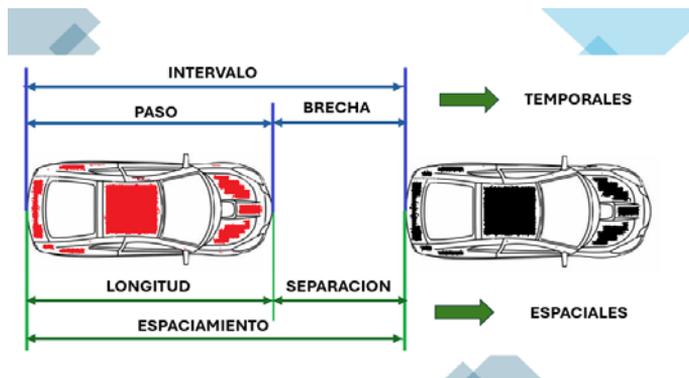
Fuente: Autores.

Parámetros microscópicos

Los *parámetros microscópicos* caracterizan a los vehículos dentro de la corriente vehicular; mientras que los *parámetros macroscópicos* muestran las características de la vía en función de las corrientes vehiculares en forma conjunta.

La Figura 4.2 muestra gráficamente la posición de los parámetros microscópicos, temporales y espaciales.

Figura 4.2. Parámetros microscópicos temporales y espaciales



Fuente: Adaptado de "Relación de tiempo y espacio entre vehículos", en Cal *et al.* (2007), p. 290.

Los parámetros microscópicos tienen una relación geométrica que se expresa de forma analítica. La brecha (b) se calcula como el cociente entre la separación (S_e) y la velocidad (v):

$$= \frac{S_e}{v}$$

El paso (p) se calcula como el cociente entre la longitud (L) y la velocidad (v):

$$p = \frac{L}{v}$$

El intervalo (h_i) puede obtenerse como el cociente entre espaciamiento (E_s) y la velocidad (v):

$$h_i = \frac{E_s}{v}$$

Se debe especificar que el intervalo puede clasificarse en:

- Intervalo simple (h_i): Intervalo de tiempo que transcurre entre el paso de dos vehículos consecutivos por un punto específico, medido tomando como referencia un mismo punto en cada vehículo.

- Intervalo promedio (\bar{h}): Es el promedio de los intervalos simples, y se obtiene mediante la sumatoria de los intervalos simples entre el número de intervalos.

O en su defecto puede calcularse sumando la brecha y el paso:

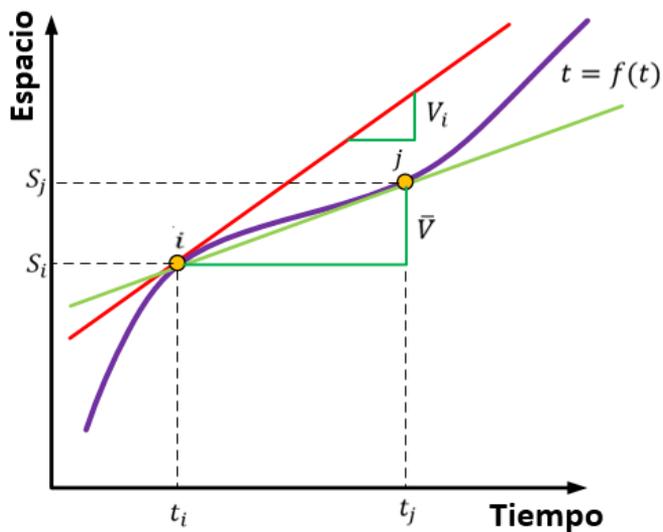
$$h_i = b + p$$

Finalmente, puede determinarse el espaciamiento por la suma de la separación y la longitud:

$$E_s = S_e + L$$

Es de gran importancia la relación existente y mostrada en el diagrama espacio-tiempo (Figura 4.3); aquí se aprecia la determinación de la velocidad en un punto o tiempo específico de la trayectoria del vehículo. Esto es posible aplicando cálculo diferencial como método analítico mediante la primera derivada de la función o aplicando métodos geométricos. El método geométrico consiste en trazar una recta tangente al punto de interés sobre la función y calculando su pendiente, la cual será igual a la velocidad. En la Figura 4.3, se aprecia la recta secante trazada tocando dos puntos de la función. Calculando la pendiente de dicha recta se obtiene la velocidad promedio experimentada por el vehículo entre los dos puntos.

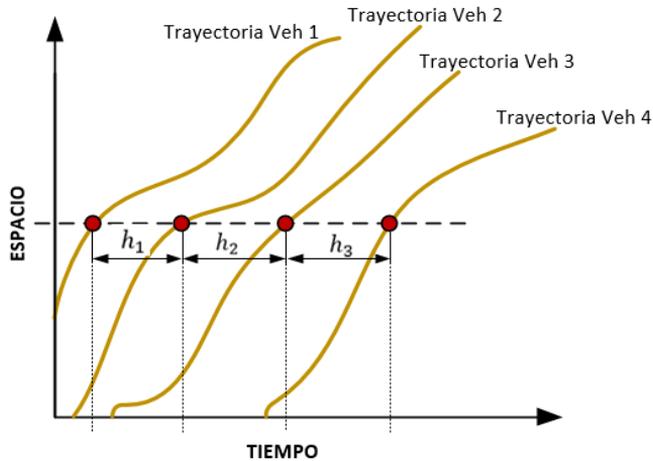
Figura 4.3. Gráfica espacio-tiempo estimación de velocidad a partir de la pendiente



Fuente: Autores.

En la Figura 4.4, se muestra un diagrama espacio-tiempo, solo que en este caso aparece la trayectoria de cuatro vehículos. Para este caso, se traza una recta paralela al eje de las abscisas (horizontal) para fijar un punto con un valor constante del espacio y determinar en qué tiempo específico cada vehículo atraviesa ese punto. Esto crea tres intervalos entre los vehículos; usando estos datos de intervalos se determina el intervalo promedio (\bar{h}).

Figura 4.4. Gráfica espacio-tiempo y determinación del intervalo entre vehículos



Fuente: Adaptada de "Variables del flujo vehicular en el espacio y el tiempo", en Cal *et al.* (2007), p. 286.

El intervalo promedio lo obtenemos mediante la expresión siguiente:

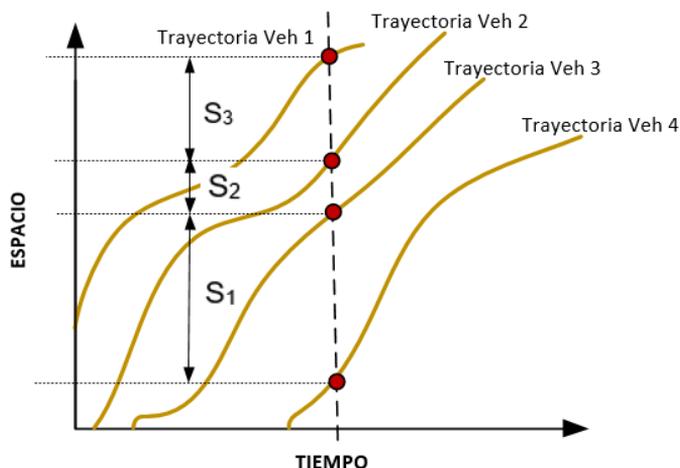
$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} h_i}{n-1}$$

De esta forma, podemos entender que el intervalo promedio es el inverso del volumen:

$$\bar{h} = \frac{1}{Q}$$

En la Figura 4.5, aparece de igual manera, un diagrama espacio-tiempo con la misma trayectoria de los cuatro vehículos. Para este caso, se traza una recta paralela al eje de las ordenadas (vertical) para fijar un punto con un valor de tiempo constante y determinar en qué posición espacial exacta estaban los vehículos para esa unidad de tiempo. Esto crea tres espacios entre vehículos; usando estos datos de espacios se determina el espaciamiento promedio (\bar{s}).

Figura 4.5. Gráfica espacio-tiempo y determinación del espaciamiento entre vehículos



Fuente: Adaptada de "Variables del flujo vehicular en el espacio y el tiempo" en Cal *et al.* (2007), p. 286.

El espaciamiento promedio lo obtenemos mediante la expresión siguiente:

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} S_i}{n-1}$$

De esta forma podemos entender que el espaciamiento promedio es el inverso de la densidad:

$$\bar{S} = \frac{1}{K}$$

Con base en los análisis de la gráfica espacio-tiempo de la Figura 4.3, se puede decir que la pendiente de una recta tangente a un punto de la trayectoria es igual a la velocidad en ese punto. Por tanto, como el espaciamiento (S) es unidad de distancia y el intervalo (h) es unidad de tiempo, podemos considerar que:

$$\bar{v} = \frac{\bar{S}}{\bar{h}}$$

Despejando el espaciamiento promedio, tenemos:

$$\bar{S} = \bar{v} * \bar{h}$$

Conociendo que:

$$\bar{h} = \frac{1}{Q} \text{ y } \bar{S} = \frac{1}{K}$$

Podemos sustituir, obteniendo:

$$\frac{1}{K} = \bar{v} * \frac{1}{Q}$$

Los análisis de los parámetros microscópicos que van referidos a la interacción entre vehículos establecen la relación básica para describir el flujo vehicular y dan origen a los parámetros macroscópicos.

Parámetros macroscópicos

Los parámetros macroscópicos son capaces de describir el tránsito y existe un gran número de variables que pueden ser estudiadas. Los parámetros macroscópicos son el volumen, la velocidad y la densidad del tránsito; la relación entre ellos se conoce como la Ecuación Fundamental del Tránsito:

$$Q = v * K$$

donde:

Q - Volumen o razón de flujo

v - Velocidad

K - Densidad

- *Tasa de flujo vehicular*: Corresponde a la frecuencia de circulación de una serie de vehículos en un punto específico de la vía y en el transcurso de una hora.
- *Volumen o razón de flujo (Q)*: Número de vehículos o personas, según sea el caso, que pasan por determinado punto en un tiempo específico. La

unidad de tiempo empleada para expresar el volumen o tasa de flujo por lo general es un día, aunque varía dependiendo de las intenciones del estudio. La tasa de flujo o volumen puede ser por hora, día, semana, mensual o anual. De una forma operativa es más conveniente usar volúmenes horarios. El volumen se puede determinar a partir de un conteo directo en la vía, el cual se conoce como aforo.

- *Densidad (K)*: La densidad de tránsito es el número de vehículos o personas que se encuentran en determinado tramo de la vía en un tiempo fijo, se da en unidades de cantidad de vehículos o personas entre la distancia. Mientras más vehículos pretendan recorrer la longitud (L) en el tiempo (t), mayor será la densidad y se obtiene por la expresión siguiente:

$$K = \frac{n}{d}$$

donde:

n - cantidad de vehículos o personas

d - distancia para la cual se contabilizaron vehículos y personas

Otra expresión usada para el cálculo de densidad es:

$$K = \frac{Q}{v_v}$$

donde:

Q - razón de flujo

v_v - velocidad promedio de viaje

Análisis de velocidades

Velocidad, (v): Es una razón de movimiento y tiene gran importancia dentro del transporte, ya que es la relación entre la distancia recorrida por el vehículo y el tiempo que demora en hacerlo. La velocidad está relacionada con la calidad del viaje y es uno de los pocos parámetros que puede ser percibido por el conductor y por los demás usuarios de la vía. Se expresa en distancia por unidad de tiempo, por lo general como millas por hora (m/h) o como kilómetros por

hora (km/h). Dentro de la Ingeniería de Tránsito es de sumo interés estudiar las velocidades de los vehículos en determinados tramos de la carretera, y esta es muy cambiante ya que está influenciada por un sinnúmero de factores. Por esto, dentro del área de estudio, existen conceptualmente diferentes definiciones de velocidad, que dependen del estudio que se efectúa y los objetivos que se persiguen.

La velocidad constante, es decir que no cambia en el tiempo, donde la aceleración es nula, se expresa mediante la fórmula básica siguiente:

$$v = \frac{d}{t}$$

donde:

d - distancia

t - tiempo

Velocidad de punto (v_p): Es la velocidad que experimenta un vehículo a su paso por un punto específico o sección transversal de la carretera.

Velocidad instantánea (v_i): Es la que experimenta un vehículo cuando circula a lo largo de un tramo de la vía.

Velocidad promedio de viaje (v_v): Se considera una medida de tránsito y se obtiene mediante la observación de los vehículos que pasan en un tramo de carretera determinado. Es el cociente entre la longitud del tramo de carretera y el tiempo promedio que demoran los vehículos en recorrerlo (incluyendo las paradas y demoras).

Velocidad media temporal (v_{mt}): Está relacionada con la velocidad de punto, ya que es su media aritmética. En este caso, se toman las velocidades de punto de los vehículos que pasan por un lugar específico de la carretera en

un intervalo de tiempo determinado. Básicamente, se obtiene una distribución temporal de velocidades de punto:

$$v_{mt} = \frac{\sum_{i=1}^n v_p}{n}$$

donde:

n - número de vehículos observados

Velocidad media espacial (v_{me}): Se entiende, como la media aritmética de las velocidades instantáneas de varios vehículos sostenidos en un segmento de la vía. Esta se define matemáticamente como:

$$v_{me} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$$

Velocidad de recorrido (v_R): Es conocida también como velocidad global o de viaje; en este caso, se determina tomando toda la distancia recorrida, desde el origen hasta el destino, y se divide entre el tiempo total que se demoró en ese recorrido. Lo importante es saber cuál tiempo debe ser medido y cuál no. Para ser claros en este aspecto, es importante definir que la velocidad de recorrido no comprende los tiempos por demora fuera de la vía (paradas en gasolineras, restaurantes, baños, compras fuera de la vía, paradas por motivo de ocio o descanso, etc.). Sí serán incluidas aquellas demoras provocadas por tránsito y dispositivos de control; es decir, todas las que son por motivos ajenos al chofer de la unidad.

Velocidad de marcha (v_{Ma}): Esta es conocida como velocidad de crucero; para esta velocidad se toma la distancia total del viaje y se divide entre el tiempo que el vehículo estuvo en movimiento. Por lo que para la velocidad de marcha no se consideran los tiempos en los que el vehículo se detuvo por cualquier motivo, estos serán descontados.

Velocidad de proyecto (v_{Pr}): También se conoce como velocidad de diseño, y es la máxima que pueden recorrer legalmente los vehículos en un tramo de la vía con seguridad, considerando que las condiciones climáticas y del

propio tránsito sean favorables, por lo que solo las características geométricas de la vía rigen la circulación.

Velocidad de flujo libre (v_0): Esta velocidad, conocida también como FFS (por sus siglas en inglés, *Free Flow Speed*), es la que experimenta un vehículo en la vía en condiciones de bajos volúmenes de tránsito; por lo que el conductor puede alcanzar la máxima velocidad de circulación sin restricciones causadas por otros conductores.

Velocidad de percentil (v_{per}): Se define como la velocidad máxima por debajo de la cual viajan un porcentaje de los vehículos en un mismo sentido de circulación. Por lo general, la velocidad más usada es de 85 percentil. Esta velocidad es la velocidad que en determinada vialidad solo es superada por 25 % de los vehículos.

Relación entre los tres parámetros básicos

Con anterioridad se describieron los parámetros básicos presentes en la Ecuación Fundamental del Tránsito. En esta sección analizaremos la relación entre los tres parámetros. El análisis de esta relación se realizará analítica y gráficamente; la primera relación será la relación entre la velocidad y la densidad, mientras que la segunda relación será entre la tasa de flujo y la densidad; por último, analizaremos la relación entre la velocidad y el flujo.

RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y LA DENSIDAD

El modelo lineal de Greenshields, obtenido a partir de investigaciones básicas sobre el comportamiento del flujo vehicular, establece una velocidad-densidad, utilizando el método de mínimos cuadrados para su ajuste.

$$v = v_0 - \left(\frac{v_0}{K_C}\right)K$$

donde:

v - velocidad media, km/h

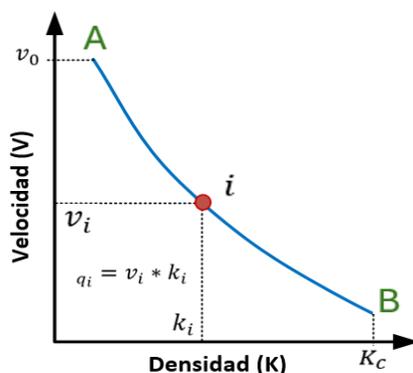
K - densidad, veh/km

v_0 - velocidad a flujo libre, km/h

K_C - densidad de congestión, veh/km

Si representamos de forma gráfica esta relación (Figura 4.6), podemos ver que al comenzar en determinada vialidad con vehículos que viajan a una velocidad de flujo libre, en la medida que esta velocidad disminuye por las características propias del tránsito, la densidad aumenta. La densidad aumenta hasta llegar a un punto de congestión muy cercano a un valor de velocidad cero.

Figura 4.6. Relación entre los parámetros velocidad y densidad



Fuente: Adaptada de "Relación lineal entre la velocidad y la densidad", en Cal *et al.* (2007), p. 295.

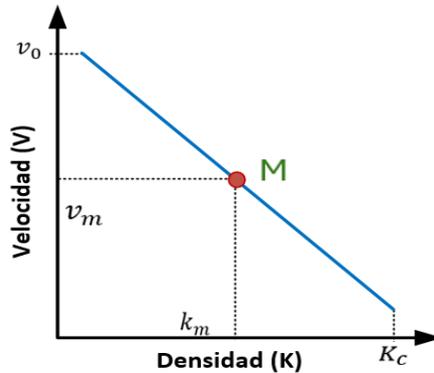
En la Figura 4.7, podemos ver cómo la tendencia de la curva velocidad-densidad es lineal, presentando una recta decreciente con una relación inversamente proporcional entre los parámetros. De esta gráfica podemos deducir que M (punto medio) toma gran interés para los estudios de Ingeniería de Tránsito. Es porque exactamente en este punto, las vías exponen la mejor relación entre comodidad para los usuarios y la ocupación de la capacidad de la vía. El punto M da como resultado la aparición de una velocidad media (v_M) y una densidad media (K_M). Ambos parámetros se obtienen numéricamente de la forma siguiente:

$$v_M = \frac{v_0}{2} \quad K_M = \frac{K_C}{2}$$

Usando la Ecuación Fundamental del Tránsito: $Q = v * K$ llevada al punto medio (M), tenemos que: $Q_M = v_M * K_M$. Por lo tanto, es posible determinar una tasa de flujo para el punto de interés. Teniendo finalmente que la tasa de flujo en el punto medio queda de la forma siguiente:

$$Q_M = \frac{v_0 * K_M}{2}$$

Figura 4.7. Tendencia lineal de la relación entre los parámetros velocidad y densidad



Nota. Fuente: Adaptada de "Relación lineal entre la velocidad y la densidad", en Cal *et al.* (2007), p. 295.

En este punto, habiendo comprendido el comportamiento entre el parámetro velocidad y densidad y haciendo uso de la ecuación fundamental del tránsito, podemos obtener la relación siguiente:

Si:

$$v = v_0 - \left(\frac{v_0}{K_c}\right)K$$

Entonces:

$$Q = v * K = \left[v_0 - \left(\frac{v_0}{K_c}\right)K \right] K$$

Resolviendo, finalmente obtenemos:

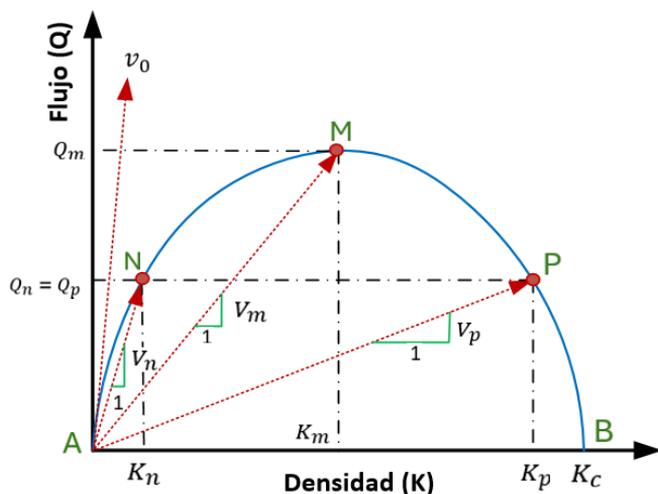
$$Q = v_0 K - \left(\frac{v_0}{K_c}\right) K^2$$

Y esta expresión nos da de forma precisa la relación entre el flujo (Q) y la densidad (K) que veremos a continuación.

RELACIÓN ENTRE LA TASA DE FLUJO Y LA DENSIDAD

En la Figura 4.8, se muestra la tendencia del comportamiento entre dos parámetros fundamentales del tránsito, flujo y densidad, obteniendo como resultado una curva con un comportamiento parabólico vertical que abre hacia abajo. Esta parábola tiene un vértice, al cual llamaremos M , cuyas coordenadas serían un valor máximo de flujo y un valor medio de densidad. Se muestran también dos puntos de interés N y P , los cuales aparecen en la intercepción del valor medio del flujo. El punto A es el origen y el punto B es el valor máximo que toma la densidad, punto que coincide con la densidad de congestión (K_c).

Figura 4.8. Tendencia parabólica de la relación entre los parámetros flujo y densidad



Fuente: Adaptada de "Relación parabólica entre el flujo y la densidad", en Cal *et al.* (2007), p. 296.

En la gráfica de la Figura 4.8, se pueden trazar rectas desde el origen **A** hasta los puntos de interés **P; M; N**. Estas rectas son monótonas, crecientes y forman un triángulo rectángulo usando el eje de las abscisas y una paralela al eje de las ordenadas. Aplicando conocimientos básicos de trigonometría, podemos determinar la pendiente de las rectas; también podemos calcular la primera derivada de la función parabólica para saber el valor de la velocidad en cada uno de los puntos.

De una forma sencilla, podemos conocer que, despejando la Ecuación Fundamental del Tránsito: $Q = v * K$, obtenemos:

$$v = \frac{Q}{K}$$

Por lo tanto,

$$\text{la pendiente de la recta AN} = v_N = \frac{Q_N}{K_N}$$

$$\text{la pendiente de la recta AP} = v_P = \frac{Q_P}{K_P}$$

$$\text{la pendiente de la recta AM} = v_M = \frac{Q_M}{K_M}$$

Después de los análisis gráficos anteriores, podemos deducir, a partir de la Ecuación fundamental:

$$Q = v * K$$

$$v = v_0 - \left(\frac{v_0}{K_C}\right)K$$

$$K = K_C - \left(\frac{K_C}{v_0}\right)v$$

Sustituyendo y unificando las expresiones anteriores tenemos:

$$Q = v * K = v \left[K_C - \left(\frac{K_C}{v_0} \right) v \right]$$

Y esto nos da una expresión que relaciona directamente la velocidad con el flujo:

$$Q = v * K_C - \left(\frac{K_C}{v_0} \right) v^2$$

También despejando obtenemos una expresión para el cálculo de velocidad a partir de su relación con el flujo:

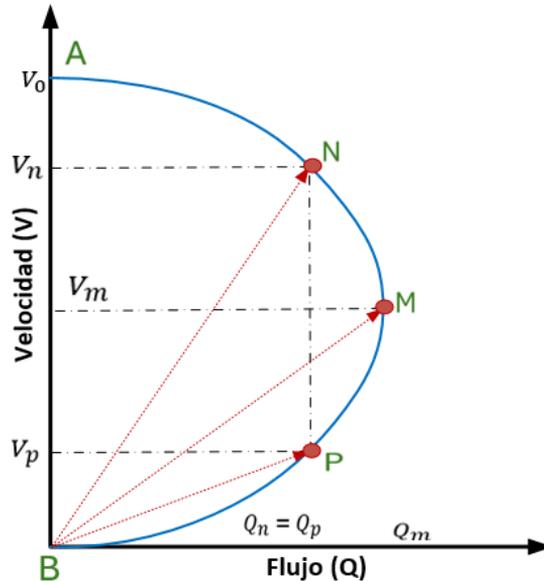
$$v = \frac{v_0}{2} \pm \frac{\sqrt{v_0^2 - 4Q \left(\frac{v_0}{K_C} \right)}}{2}$$

RELACIÓN ENTRE LA VELOCIDAD Y LA TASA DE FLUJO

Según la expresión deducida anteriormente se construye la gráfica de la Figura 4.9, donde colocaremos la velocidad en el eje vertical (ordenadas) y en el eje horizontal (abscisas) el flujo.

En la gráfica tenemos una curva con un comportamiento parabólico horizontal que abre hacia la izquierda. El vértice de esta parábola lo llamaremos **M** cuyas coordenadas serían un valor máximo del flujo y un valor medio de la velocidad. Se muestran también dos puntos de interés **N** y **P**. El punto **B** es el origen y el punto **A** es el valor máximo que toma la velocidad o velocidad a flujo libre.

Figura 4.9. Tendencia parabólica de la relación entre los parámetros velocidad y flujo

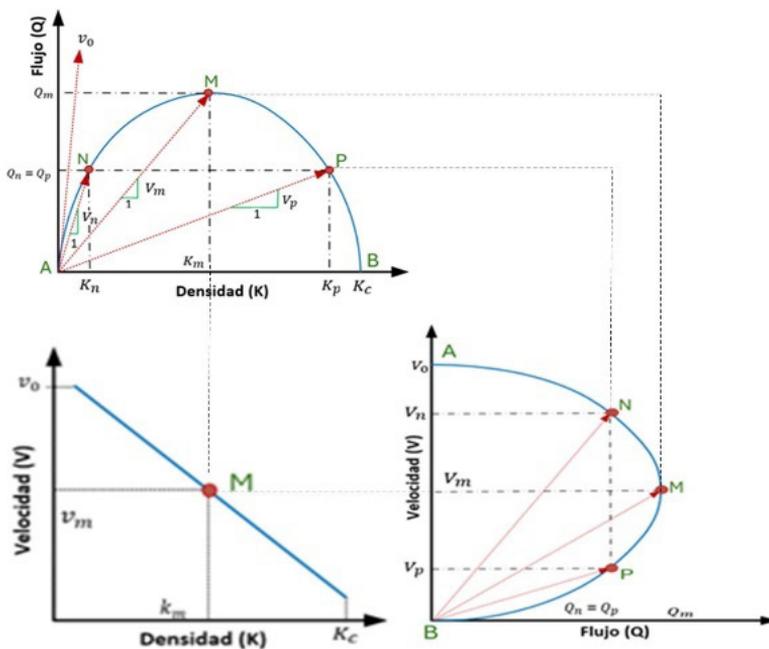


Fuente: Adaptada de "Relación parabólica entre el flujo y la velocidad", en Cal *et al.* (2007), p. 298.

En la Figura 4.10, se muestra la relación entre las tres gráficas generadas mediante un esquema técnico de posiciones, donde se aprecia la relación de coincidencias entre los puntos geométricos. El comportamiento de estas gráficas depende de las condiciones reales del tránsito en el tramo de la vía que se analiza. En la esquina derecha superior (sección I), aparecen las líneas técnicas para la traslación de los puntos. En la esquina izquierda superior (sección II), se muestra la gráfica de relación entre tasa de flujo y densidad. En la esquina inferior izquierda (sección III), aparece la gráfica de relación entre velocidad y densidad, mientras que en la esquina inferior derecha (sección IV), se muestra la relación entre la velocidad y el flujo.

La zona sombreada en cada sección de la gráfica representa las regiones de no congestión vehicular, donde se ve que siempre se cumple que para el flujo en la región $0 \leq Q \leq Q_M$ no hay congestión; para la densidad en la región $0 \leq K \leq K_M$ no hay congestión; y para el caso de la velocidad, la región siguiente $v_M \leq v \leq v_0$ no presenta congestión.

Figura 4.10. Relación entre los diagramas fundamentales del tránsito



Fuente: Adaptada de "Diagrama fundamental del flujo vehicular", en Cal *et al.* (2007), p. 299.

Capítulo 5

Funciones de Volumen-Demora



Generalidades de la Función Volumen-Demora

Las funciones volumen-demora tienen gran uso y aplicación en el transporte terrestre ya que permiten modelar el fenómeno de congestión vehicular. Esto da una medida de la dependencia del tiempo de recorrido, en función del volumen o razón de flujo en la vía. La congestión puede ser estudiada desde diferentes puntos de vista y es un fenómeno que afecta notablemente el desempeño del transporte terrestre de carga y pasajeros. La Función Volumen-Demora (FVD), permite aproximaciones bastante representativas de los flujos de circulación en rutas de la red de transporte, ya sea este de carga o pasajeros. La principal aplicación de la FVD es modelar el tránsito vehicular en condiciones de congestión. Por lo antes expuesto, el estudio a partir de las funciones volumen-demora es; de interés para la comunidad científica y la Ingeniería del Transporte, como se aprecia en los trabajos de Foytik & Cetin (2011), Chen (2011), Thomas *et al.* (2012), Castillo *et al.* (2013) y Mtoi & Moses (2014), entre otros.

Propiedades fundamentales de la FVD

La FVD representa el tiempo de recorrido en un arco, donde la variable argumento puede ser el volumen o razón de flujo vehicular o el porcentaje de la capacidad del arco.

La FVD es positiva, continua, monótona creciente y acotada en el dominio de su definición. Esto provoca que el volumen y el tiempo de recorrido sean directamente proporcionales, al incrementarse uno aumenta progresivamente el

otro. Por lo que se obtiene un valor máximo del tiempo de recorrido cuando se llega a la saturación vehicular.

La FVD analíticamente es muy sencilla, por lo que su aplicación es muy común resolviendo muchas situaciones en la red vial.

La FVD es usada para el cálculo de costos marginales y facilita el uso de técnicas de optimización basadas en el gradiente de la función. Para esto, se requieren derivadas de primero y segundo orden como mínimo, para que represente el cambio del tiempo en función de la ocupación de la vía.

No se puede trabajar con funciones de volumen densidad sin antes comprender el fenómeno de la congestión vehicular, el cual está influenciado directamente por la velocidad de circulación y el flujo presente en determinada red vial.

Relación entre velocidad y flujo

La relación entre la velocidad y el flujo vehicular rige o determina la congestión, y este fenómeno es observable por los conductores y/o usuarios de la vía con la disminución de la velocidad y, en consecuencia, del aumento del volumen en la vía. Las curvas de velocidad-flujo descritas matemáticamente pueden describir con mucha precisión el fenómeno de la congestión.

Existen muchos programas implementados en ordenadores que son capaces de realizar estas curvas, como el caso de COBA (Cost-Benefit Analysis) del Departamento del Transporte del Reino Unido. Según el Lancashire County Council, (2010), se expresa matemáticamente de esta forma:

$$S(Q) = \begin{cases} S_0 & \text{para } Q \leq F \\ S_0 + \frac{(S_1 - S_0)(Q - F)}{(C - F)} & \text{para } F < Q \leq C \\ \frac{S_1}{1 + \frac{S_1(Q - C)}{8dC}} & \text{para } Q > C \end{cases}$$

donde:

S - velocidad en el tramo. (km/h)

t - tiempo del recorrido del tramo (hora)

d - longitud del tramo (km)

Q - flujo en el tramo

S_0 - velocidad a flujo libre

S_1 - velocidad a la capacidad del tramo

F - máximo flujo en el cual las condiciones del flujo libre prevalecen

C - capacidad del tramo

En el caso que se plantea, en que el volumen es mayor que la capacidad del tramo ($Q > C$), se puede deducir que es improbable que esto suceda en situación real. En verdad, esta condición trata de explicar el intento de que en un caso real flujos adicionales a la saturación existente en el tramo traten de ocuparlo, creando inestabilidad y acumulación vehicular en la entrada a la red vial.

En los estudios de modelación, conviene tener en cuenta que, para flujos mayores a la capacidad del tramo en estudio ($Q > C$), la velocidad se mantiene constante en la correspondiente a la del flujo de saturación (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Las funciones de congestión destacan la relación existente entre la capacidad de la vía y los tiempos de recorrido y, a su vez, relacionan el tiempo de recorrido con el flujo vehicular. Lo más común es que este tipo de funciones realicen un proceso llamado normalización del volumen. Este proceso consiste en una simple operación matemática de dividir el tiempo de viaje a flujo libre o a máxima velocidad permitida entre la capacidad:

$$t = t_0 * f\left(\frac{q}{C}\right)$$

donde:

t - tiempo de viaje del arco

t_0 - tiempo de viaje a flujo libre

q - flujo sobre el arco

C - capacidad

La siguiente fórmula permite calcular el costo marginal, que no es más que la aportación al tiempo total por la introducción marginal de nuevo vehículo al flujo vial:

$$C_{mg} = t + q \frac{\partial t}{\partial q}$$

donde:

t - tiempo medio del arco

- adiciona la introducción marginal del tiempo sobre el flujo total. (Por cada vehículo que se incorpora al segmento de vía en estudio, se agregan tiempos a los usuarios que ya estaban en la red vial.)

Funciones volumen-demora más empleadas

La función de la BPR (Bureau of Public Roads), en la actualidad se conoce como $q * \frac{\partial t}{\partial q}$ *Federal Highway Administration*. La BPR es la que toma mayor notoriedad porque es capaz de lograr grandes resultados con procesos bastantes simples. En el caso de Castillo *et al.* (2013), determina funciones volumen-demora, basadas en las conocidas funciones BPR, donde evalúa diferentes condiciones principalmente en casos de adelantamiento.

FUNCIÓN BPR

$$t(x) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C} \right)^\beta \right]$$

donde:

t_0 - tiempo de flujo libre

x - flujo en el tramo

C - capacidad

α, β - parámetros de calibración (Ortuzar and Willumsen, 2011)

La primera derivada de la función BPR es:

$$\frac{\partial t}{\partial v} = \beta t_0 \alpha \left(\frac{x}{C}\right)^{\beta-1} \left(\frac{1}{C}\right)$$

Con el planteamiento anterior, la función de costo marginal BPR queda así:

$$C_{mg} = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C}\right)^{\beta} (1 + \beta) \right]$$

FUNCIÓN CÓNICA DE VOLUMEN-DEMORA

$$t_{(x)} = t_0 \left[2 + \sqrt{\alpha^2 \left(1 - \frac{x}{C}\right)^2 + \beta^2} - \alpha \left(1 - \frac{x}{C}\right) - \beta \right]$$

donde:

t_0 - tiempo de flujo libre

x - tiempo en el tramo

C - Capacidad

$\alpha > 1$; $\beta = \frac{2\alpha-1}{2\alpha-2}$ - parámetros de calibración (Spiess, 1990)

Derivando por primera vez, queda como sigue:

$$\frac{\partial t}{\partial q} = \frac{t_0}{C} \left[\alpha + \frac{\alpha^2 \left(\frac{q}{C} - 1\right)}{\sqrt{\alpha^2 \left(1 - \frac{q}{C}\right)^2 + \beta^2}} \right]$$

La función de costo marginal cónica es:

$$C_{mg} = t_0 \left[2 - \beta - \alpha \left(1 - 2\frac{q}{C}\right) + \frac{\alpha^2 \left(1 - \frac{q}{C}\right) \left(1 - 2\frac{q}{C}\right) + \beta^2}{\sqrt{\alpha^2 \left(1 - \frac{q}{C}\right)^2 + \beta^2}} \right]$$

FUNCIÓN DE DEMORA DE AKCELİK

En el caso de la función BPR y la Función Cónica de Volumen-Demora no consideran con el rigor suficiente las demoras en las intersecciones, ya que se fundamentan en las condiciones de los arcos. Tampoco consideran las demoras cuando la demanda se acerca o supera la capacidad del arco (Ortúzar & Willumsen, 2011). Con base en esto, Akcelik (1991), plantea una función que, en teoría, puede asumir estas cuestiones de una forma más aceptada. Para esto, logra considerar explícitamente las demoras que provoca la fila de vehículos en la intersección. Esta función, parte de la suposición de que no hay cola al inicio del periodo y que existe un realce en la demanda en el periodo de estudio (T).

$$t(x) = t_0 + 0.25T \left[(G_s - 1) + \sqrt{(G_s - 1)^2 + \frac{8J_A}{C_j T} G_s} \right]$$

El parámetro de demora (J_A), se acrecienta en vías secundarias e intersecciones aisladas. Por lo que en autopistas puede oscilar entre 0.1 y 1.6 en el caso de vías con alta fricción en periodos típicos de estudios (1 hora).

donde:

g - tiempo en verde del semáforo

C_s - flujo de saturación

y - longitud de ciclo

G_s - grado de saturación

t - tiempo de recorrido

t_0 - tiempo de recorrido a flujo libre

T - periodo de tiempo de modelación del flujo (típicamente 1 hora)

C_j - capacidad de la intersección

J_A - parámetro de demora

G_s - grado de saturación, (Caliper, 2005)

FUNCIÓN GENERALIZADA COSTO-DEMORA (GENERALIZA LA BPR)

La función generalizada costo-demora BPR se determina de la forma siguiente:

$$C(x) = k + \delta L + \phi t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C} \right)^\beta \right]$$

donde:

$C(x)$ - costo generalizado

k - costo fijo en el tramo

δ - costo unitario por distancia

L - longitud del tramo

ϕ - valor del tiempo

t_0 - tiempo de flujo libre

α, β - parámetro de calibración, (Caliper, 2005)

La aplicación de la FVD del Bureau of Public Roads (BPR), es utilizada con frecuencia y se pueden obtener las curvas resultantes usando diferentes valores de los parámetros de calibración (α y β). Para una modelación del flujo vehicular que resulte apegada a la realidad, se debe tener cuidado en los parámetros de calibración y en el resto de los elementos que definen estas funciones.

La Tabla 5.1, muestra los diferentes parámetros recomendados para aplicar el BPR, según las clases de las carreteras. Mientras que en la Tabla 5.2, se observan los parámetros para las funciones velocidad-flujo en localidades del Reino Unido.

Tabla 5.1. Parámetros recomendados por vialidades BPR

Tipo de carretera	Velocidad a flujo libre, (km/h)	Espaciado de señal, (señal/km)	Velocidad de saturación, (km/h)	a	b
CLASE I	80	0.33	53	0.34	4.0
	80	1.00	31	0.74	5.0
CLASE II	80	2.5	15	1.16	6.0
	65	0.5	40	0.38	5.0
	65	1.0	28	0.70	5.0
	65	2.0	18	1.00	5.0
CLASE III	55	2.0	17	0.96	5.0
	55	3.0	13	1.00	5.0
	55	4.0	10	1.40	5.0
CLASE IV	50	4.0	10	1.11	5.0
	50	5.0	8	1.20	5.0
	50	6.0	7	1.50	5.0

Fuente: *Constante Normativa Norte Americana*, Transportation Research Board (TBR), 2010.

Tabla 5.2 Parámetros de funciones velocidad-flujo en el Reino Unido

Tipo de carretera	- Velocidad a flujo libre, (km/h).	- Velocidad en saturación, (km/h)	F - Flujo crítico, (PCU/h), Predicted Peak Flows/hour	Capacidad, (PCU/h), Predicted Peak Flows/hour
Rural D3 Motorway. Interurbana, 3 carriles por sentido.	116	45	3600	7560
Rural D2 Motorway. Interurbana, 2 carriles por sentido.	112	45	2400	4860
Rural D2/AP (A Truck). Interurbana, 2 carriles por sentido, uso general (All purpose). Troncal.	108	45	2160	4520
Rural D2/AP. Interurbana, 2 carriles por sentido, uso general (All purpose).	105	45	2160	4360
Rural D3/AP. (A Truck). Interurbana, 3 carriles por sentido, uso general. Troncal.	108	45	3240	6780
Rural D3/AP. Interurbana, 3 carriles por sentido.	105	45	3420	6540

Fuente: Adaptada de Lancashire County Council, 2010.

Existen análisis realizados por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) para la asignación intermodal de carga, como el caso de Centeno y Mendoza (2003), en el cual emplean sistemas de información geográfica (SIG), donde se combina ArcView con un programa de asignación llamado STAN.

En el estudio realizado Moreno, Rico y Bustos (2014) realizaron un estudio titulado "Funciones volumen-demora en la modelación de flujos vehiculares" donde emplearon valores estándares de los parámetros α y β específicamente en el contexto mexicano.

Generalidades de la planificación mediante modelos de redes de transporte terrestre

Dentro de los estudios de la Ingeniería de Tránsito, un factor de gran importancia es analizar y estimar las tasas de flujos que se mueven en las vías de todo el país. El conocimiento de las redes de transporte terrestre se convierte en una tarea elemental para la gestión, la administración y el mantenimiento de la infraestructura vial. Con base en la estimación correcta y el conocimiento de los volúmenes en las redes viales, se posibilita el diseño de políticas para atenuar los impactos negativos, al medio ambiente y a la movilidad en general.

El empleo de la modelación matemática está presente en esta rama de la ciencia, con una gran influencia en la determinación del flujo vehicular en diferentes tramos de la red. Los modelos matemáticos denominados *de asignación de tránsito* pueden calcular, con cierto grado de precisión, las tasas de flujo vehicular en las rutas seleccionadas. Para el correcto desarrollo e implementación de modelos de asignación de tránsito, se necesita conocer la topología de la red que va a ser estudiada y sus atributos. También es crucial tener información de la matriz origen-destino, tener previamente calculado el efecto de la ocupación vehicular sobre tiempo y costo, a partir de su modelación usando las FVD.

Dentro de un modelo de asignación de tránsito, las FVD garantizan la consideración de la afectación provocada en el tiempo de recorrido de la ruta por la afluencia de más vehículos en el tramo de la vía. Las funciones de volumen-demora, permiten alimentar criterios que facilitan obtener mejores tiempos de recorrido y optimizar el rendimiento de combustible de los vehículos que atraviesan la red de tránsito.

Los modelos de asignación de tránsito emplean dos criterios muy importantes; dichos criterios fueron propuestos por J. G. Wardrop en la segunda mitad del siglo xx:

1. Equilibrio del Usuario (EU)
2. Equilibrio del Sistema (ES)

En EU aparece en las redes viales, por la propia libertad del usuario al decidir, bajo sus criterios de subjetividad, la que entiende como mejor ruta para moverse de origen a destino. Por lo general, los usuarios tratarán de elegir la ruta más corta entre los dos puntos de movimiento, al momento de comenzar su viaje. En lo que la situación de la vía cambia, el usuario se ve obligado a modificar su ruta inicial buscando acortar el tiempo de recorrido. Como estas modificaciones se realizan de forma individual y sin pensar en el resto de los usuarios, esto trae como resultado que, producto de la saturación de la red vial, cualquier ruta seleccionada da el mismo tiempo de recorrido, y pierde sentido el modificar la ruta inicial. A esto se le conoce como estado de equilibrio, donde un cambio en la ruta inicial no reduce significativamente el tiempo de recorrido.

Sin embargo, en el ES, la selección de los usuarios y la modificación de sus rutas traen como resultado que el tiempo total que todos juntos hacen en su recorrido en las rutas de la red es mínimo o equivalente (el tiempo promedio de todos los recorridos son mínimos). Este criterio no ocurre de manera espontánea, ni por acuerdo común de los usuarios. Los resultados del ES son normativos, al ser la condición más deseada en la red vial, es necesaria la intervención y la gestión del hombre mediante el empleo de métodos, modelos y modificaciones a las estructuras viales.

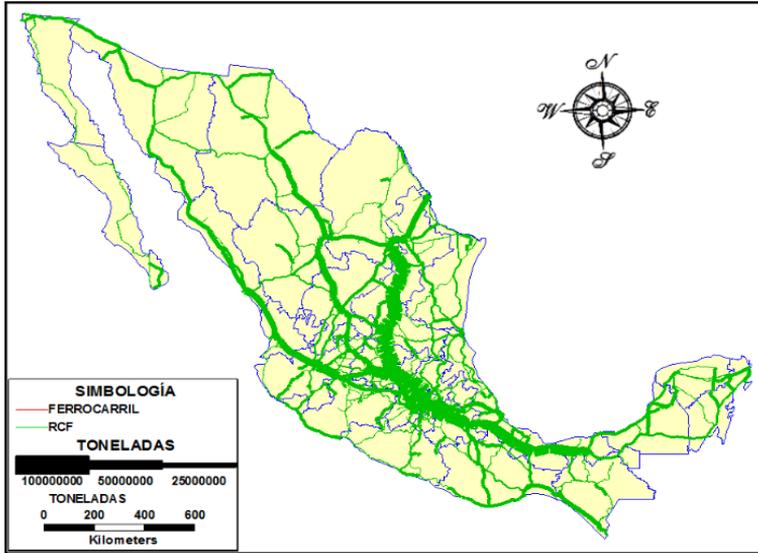
En la parte pragmática de la gestión de redes viales, se emplea mucho el criterio denominado "Todo o Nada". Este criterio no permite considerar la congestión y los costos de recorrido y las rutas se consideran invariables. Este criterio emplea los términos y procedimientos tradicionales donde se persigue la obtención de rutas más cortas, como el caso de Dijkstra. El algoritmo de Floyd se emplea para encontrar las mínimas rutas en toda la red vial. El criterio "Todo o Nada" tiene sus limitaciones, ya que su empleo es más apropiado en condiciones de volúmenes no intensos y no hay posibilidad de una congestión o en redes ferroviarias donde el control de la movilidad es mucho más elevado.

Los modelos de asignación, según Ortúzar and Willumsen (2011), pueden cumplir varios propósitos entre los que están:

- Estimar de forma global el desempeño de una red vial a partir de los flujos vehiculares totales e ingresos de los vehículos en el transporte público.
- Estimar los tiempos de recorrido de tramos importantes variando la demanda.
- Estimar el nivel de congestión de los diferentes tramos de la red.
- Identificar los pares origen-destino que usan determinado tramo de la red vial.
- Análisis de giros en la red para diseño de futuras intersecciones.

La Figura 5.1, muestra los flujos de camiones de cargas en las carretas federales de la República mexicana según la Encuesta Origen-Destino 2010 (Moreno *et al.*, 2014). En dicha imagen se observan las toneladas movidas mediante las líneas de color verde, mientras más gruesas esas líneas, mayor es el flujo vehicular. Para este estudio se empleó la Función V-D BPR usando el tiempo medio de recorrido, desarrollado con el software TransCAD (Moreno, Rico y Bustos, 2014).

Figura 5.1. Flujos de camiones de cargas en las carretas federales



Fuente: Tomado de Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 1ª. Etapa. Publicación Técnica No. 413.

Según Moreno, Rico y Bustos (2014), los flujos más intensos se dan en el centro del país y cerca de la Zona Metropolitana de CDMX. Otras zonas que presentan un alto flujo vehicular son las conexiones hacia la frontera norte pasando por Monterrey y Guadalajara, y los flujos que se desplazan buscando la costa Sureste, o lo que es el Golfo de México cercana a las zonas petroleras.

Capítulo 6

Aforo vehicular



Generalidades de los aforos vehiculares

En la Ingeniería de Tránsito, las metodologías para la recolección de datos mediante encuestas y conteos son muy variadas (Slinn, M; Matthews, P & Guest, P, 2005).

Estas metodologías se implementan dependiendo de los objetivos de la investigación a realizar, pero de forma general, existen dos metodologías para la recolección de este tipo de datos: La encuesta origen-destino, que no es más que la declaración del conductor sobre el recorrido asignado. Y el conteo *in situ*, correspondiente a la ubicación de una persona encargada de recolectar los datos en una intercepción o punto de interés para realizar el conteo de vehículos mediante el empleo de planillas previamente confeccionadas.

El análisis de las características de la tasa de flujo y su intensidad son requisitos elementales para el diseño, la planeación y la operación en carreteras, calles, autopistas y cualquier vialidad, dando una idea del nivel de eficiencia y operación de la vía.

El volumen de tránsito es el parámetro fundamental para analizar la movilidad en las carreteras, y no es más que la cantidad de vehículos que pasan por un lugar específico.

Análisis y determinación de volúmenes vehiculares

Con el estudio de las tres variables fundamentales del tránsito: volumen, velocidad y densidad, asociadas al conocimiento del entorno, se pueden predecir diferentes condiciones de operación a corto, mediano y largo plazo.

El volumen puede ser estudiado dependiendo de su variación horaria; su variación diaria, semanal, mensual; su variación direccional, distribución por carril y su variación geográfica.

Los volúmenes de tránsito absoluto o totales pueden ser muy diversos y están relacionados por la fórmula que permite determinar el tránsito anual (TA):

$$TA = \sum_{m=1}^{m=12} TM_m = \sum_{S=1}^{S=52} TS_S = \sum_{d=1}^{d=365} TD_d = \sum_{h=1}^{h=8760} TH_h$$

donde:

TA - tránsito anual

TM - tránsito mensual

TS - tránsito semanal

TD - tránsito diario

TH - tránsito horario

Existe también un volumen denominado tránsito en un periodo inferior a una hora (Q_i).

Los volúmenes promedio diario para diferentes periodos de tiempo se determinan de la forma siguiente:

Tránsito diario promedio anual ($TDPA$):

$$TDPA = \frac{\sum_{m=1}^{12} TM_m}{\sum_{m=1}^{12} n_m}$$

Tránsito diario promedio mensual ($TDPM$)

$$TDPM = \frac{\sum_{d=1}^{d_{max}} TD_d}{d_{max}}$$

Tránsito diario promedio semanal ($TDPS$)

$$TDPS = \frac{\sum_{d=1}^7 TD_d}{7}$$

Para hablar de aforos, se debe entender el término Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA), de gran importancia, que es la división del volumen de tránsito anual entre los días que tiene el año (365) y es usado para destacar el tráfico de una vía terrestre. Para ser obtenido correctamente el TDPA, deben colocarse estaciones de medición continua o de aforo permanente. Cuando existen condiciones que limitan la continuidad de los aforos y estos se realizan por periodos cortos de tiempo, debe ser ajustado el valor del TDPA, convirtiéndose en una estimación que con el uso de factores estadísticos considera las variaciones mensuales, semanales y diarias. Lo más usual es, en primera instancia, dividir el número de vehículos totales entre la cantidad de días en los que se efectuó el aforo.

El TDPA considera el tránsito vehicular en ambas direcciones y más aún si son carreteras de dos carriles de circulación, donde se debe prestar más atención y realizar una diferenciación entre sentidos de circulación es en vías que poseen intersecciones importantes, carriles adicionales en fases de construcción o para fines de proyectos.

Por la dificultad implicada en la realización de aforos vehiculares en todos los días del año, se recomienda tomar una muestra mediante un conteo continuo que permita generalizar el comportamiento de la población (el año completo).

Los métodos existentes para la estimación del TDPA son el presentado por la Traffic Monitoring Guide (TMG) y el método de la SCT; también es funcional aplicar una combinación de los dos métodos. Es importante tener presente que los conteos temporales, cuando son usados para estimar el TDPA, deben ser corregidos mediante el uso de factores que reducen el efecto de los sesgos estacionales.

En términos estadísticos, la estimación del TDPA se realiza mediante la inferencia estadística. La inferencia estadística es un grupo de técnicas y métodos que aplicados de forma correcta permiten sacar consecuencias, por lo general con base en mediciones experimentales. En palabras sencillas, esto permite, a partir de una muestra, inferir sobre una población, con un error medible y determinado nivel de confianza, logrando un ahorro considerable de tiempo y recursos.

Para lograr una correcta inferencia sobre la población, es básico caracterizar la muestra y tener conocimiento teórico de la distribución de probabilidad del estadístico muestral, que permitirá la estimación de un parámetro.

Los métodos paramétricos usados para estos fines son dos:

- Métodos de estimación de parámetros
- Métodos de contraste de hipótesis.

Estos métodos permiten, estadísticamente hablando, poder considerar al TDPA como media población y el TDPS como la media muestra, considerando el origen empírico de los datos medidos en el espacio muestral.

Tecnologías y tendencias actuales para la realización de aforos vehiculares

El empleo de los aforadores de tránsito constituye una ventaja cuantiosa para la eficiencia en los conteos de peatones y vehículos en los lugares de interés, ya sean fijos o temporales. Los aforadores son equipos electrónicos que monitorean y almacenan datos del tránsito. El uso de los aforos manuales, usando personas mediante la apreciación visual, son demasiado costosos, poco precisos y dependen de la confianza y la experiencia de las personas que realizan la actividad.

CLASIFICACIÓN DE AFORADORES DE TRÁFICO

Los aforadores electrónicos son capaces, no solo de detectar el flujo vehicular sino también de detectar la velocidad de los vehículos y su tipo. Permiten a las autoridades competentes, tomar decisiones importantes para el control y el mejoramiento de la movilidad.

Los aforadores de tráfico se clasifican en:

- De tubo neumático
- De lazo inductivo
- Piezoeléctrico
- Detectores no intrusivos (radares)
- Lectores de matrículas

- Otros, donde pueden encontrarse los que tienen un uso exclusivo, como son los utilizados en ciclo vías y sendas peatonales

De tubo neumático

Dentro de los contadores o clasificadores de tráfico, son muy empleados los que utilizan tubos neumáticos, ya que pueden diferenciar con gran facilidad y confiabilidad entre autos, motocicletas y bicicletas. Dentro de los aforadores de tráfico portátil destacan los que, además de realizar el conteo de vehículos, también son capaces de clasificarlos por su tipo y número de ejes. Dentro de las peculiaridades con las que cuenta este equipo, está su capacidad para discriminar a los vehículos por sentido de circulación y determinar sus velocidades individuales.

En la Figura 5.2, se muestra un ejemplo de este tipo de dispositivos, el aforador de tráfico portátil ROADPOD VT-5900, es de los más avanzados y presta un excelente servicio.

Figura 5.2. Aforador de tráfico portátil ROADPOD VT-5900



Fuente: Adaptada de *Aforador de tráfico portátil ROADPOD VT-5900*. Quadrex. <https://www.quadrex.es/>

De lazo inductivo

Las Estaciones de Captura de Datos (ECD) son las que con mayor frecuencia se han empleado en los Centros de Gestión de Tránsito (CGT) para medir el volumen o flujo vehicular. Al ser equipos con una carcasa protectora de alta durabilidad, son capaces de trabajar en condiciones climáticas extremas y de recopilar y almacenar un gran volumen de información.

Por lo general, los ECD están formados por pares de lazos inductivos, estos están embebidos en el asfalto y a su vez, se conectan a la unidad central encargada de almacenamiento y procesamiento de la información recolectada. Poseen una alta fiabilidad, siendo aptos para trabajar en peajes en sombra, pueden clasificar a los usuarios con base en dos criterios, longitud y velocidad, incluyendo hasta 15 categorías de longitud e igual cantidad de velocidades.

En la Figura 5.3, se muestra una Estación de Toma de Datos para el tráfico ADR-5000 con un protocolo integrado DGT. Esta ECD genera ficheros para almacenar los datos recogidos en campo, los cuales pueden ser almacenados con facilidad. El ADR-5000 puede detectar hasta ocho carriles de circulación, mediante sus espirales de lazo inductivo NORTECH TD-624ES. La capacidad de almacenamiento de datos es muy amplia de hasta dos años con una fiabilidad de conteo de 99.5 %. Este dispositivo puede trabajar con una autonomía de cuatro días, haciendo uso de su batería de 46 Ah.

Figura 5.3. Estación de Toma de Datos para el tráfico ADR-5000



Fuente: Adaptado de ADR-5000 Estación de toma de datos para tráfico (ETD). Quadrex.
<https://www.quadrex.es/>

Método Intrusivo-Detectores de vehículos inalámbricos

Como detectores de vehículos inalámbricos, se le conoce a un grupo de dispositivos que, de forma inalámbrica, se utilizan para el monitoreo del tránsito urbano e interurbano. Su tecnología se basa en la transmisión local de datos que pueden ser enviados mediante un punto de acceso a servidores centrales. Son una alternativa eficiente para sustituir a los bucles inductivos

y pueden ser instalados en intercepciones semaforizadas, como apoyo a los sistemas automáticos de control en dichas intercepciones. Estos dispositivos han mostrado un buen desempeño en condiciones de congestión vehicular o en lugar de filas habituales de vehículos. Esta tecnología garantiza una rápida y fácil instalación de los sensores, aunque se requiere de equipos y materiales básicos de trabajo en carreteras.

Los detectores de vehículos usan un repetidor de radio, esto les da cierta ventaja, aunque siguen siendo métodos intrusivos. Los detectores de vehículos inalámbricos evitan el uso de costosas instalaciones de cables y la incomodidad que esto implica. La comunicación inalámbrica es directa desde el sensor al concentrador, que puede ser colocado a distancias cercanas a los 150 m.

Los sensores son colocados en pequeños orificios en el asfalto y transmiten una señal directamente al Hub de comunicación. Como brindan la posibilidad de conexión de más de doce sensores a cada tarjeta, se pueden gestionar intercepciones de carreteras de gran flujo vehicular, con gran comodidad. Por lo antes mencionado, este dispositivo tiene mejor desempeño que los tradicionales sistemas de bucles inductivos.

La Figura 5.4 muestra el detector de vehículos Wireless (inalámbrico), está construido con una carcasa externa de nylon reforzado con fibra, la cual posee una alimentación independiente con una autonomía del sensor de más de cinco años. Puede trabajar a temperaturas de entre -20° y 80° C, aproximadamente, con dimensiones externas de 110 mm de diámetro y 85 mm de altura, requiriendo un orificio de 130 mm de diámetro para su instalación. Este dispositivo trabaja a una frecuencia de 868 MHz (ISM-banda sin licencia) y alcanza un radio de 150 m. Su rendimiento es bueno y basa su principio en electrónica y un algoritmo que garantiza una alta fiabilidad en la detección de vehículos, siendo ideal para las aplicaciones IoT y Smart City.

Figura 5.4. Detector de vehículos Wireless inalámbrico-sensores TDM WI



Fuente: Adaptada de Detector de vehículos Wireless (inalámbrico), Quadrex. <https://www.quadrex.es/>.

Detectores no intrusivos-Aforadores de Radar tipo Doppler

Los aforadores de tráfico mediante sistema Doppler son por lo general portátiles y trabajan mediante el uso de Radiofrecuencia; no poseen partes móviles que puedan desgastarse con facilidad y esto garantiza bajos costos de mantenimiento. Estos dispositivos poseen un radar Doppler integrado con ventajas importantes, ya que pueden trabajar en dos carriles de circulación con alta eficiencia y precisión. El error de estos equipos no supera los 3 km/h. Son capaces de medir la velocidad de los vehículos y realizar su clasificación de una forma no intrusiva; capturan datos independientes de velocidad; determinan con facilidad el número de vehículos, su clase, dirección de movimiento y separación entre autos. Pueden ser instalados fuera de la calzada y son sumamente fáciles de usar, por lo que no representan peligro alguno a la hora de su colocación y puesta en funcionamiento. Debido a esto, el costo de instalación es extremadamente bajo y no se requiere de personal especializado para ello.

En la Figura 5.5, se muestra el contador π -Radar como aforador portátil de tráfico; este puede detectar hasta diez clases de velocidades, con un rango de medición entre 4 a 255 km/h y clasificar cuatro tipos de vehículos. También puede distinguir el flujo vehicular entre sentidos de circulación. Es ligero, compacto y resistente; con estas características, garantiza que se considere dentro de los dispositivos portátiles. Posee buena comunicación haciendo uso de Bluetooth y transmisión automática de datos, su tecnología de radar permite

una captura de datos precisa y eficiente. Puede almacenar datos de recolección para más de 1 000 000 de vehículos, convirtiéndolo en un sensor de tráfico idóneo para ser usado en aplicaciones IoT y Smart City.

Figura 5.5. Radar registrador de datos tipo Doppler TMS-SA



Fuente: Adaptado de *TC-Radar Icoms TMS-SA*. Quadrex. <https://www.quadrex.es/>

Radares registradores de datos

Los radares registradores de datos se emplean para la obtención de información en tiempo real de la vía, con el fin de realizar estudios estadísticos de tráfico. En la actualidad, están equipados con una matriz LEDs y la capacidad del envío de mensajes variables.

Los específicamente llamados radares pedagógicos son un panel que, mediante luces LEDs, son capaces de mostrar a los usuarios de la vía la velocidad a la que circulan y avisar cuando superan la velocidad máxima permitida (solo informan y no son capaces de emitir sanciones). Independiente de estas funciones, pueden llevar un registro de la cantidad de vehículos y la velocidad a la que pasaron por el punto de detección, esto los hace mediante un aforador o contador que tienen integrado. El registrador de datos de tránsito interno guarda con precisión datos de volumen y velocidad en ambos sentidos; aunque como su función principal está la de informar y educar a los conductores para lograr una concientización de las regulaciones establecidas.

Este radar puede ser utilizado con diferentes objetivos, entre ellos realizar campañas de educación y sensibilización a los conductores para que sean

conscientes del daño que puede causar la circulación a velocidades no permitidas; así también para señalar a los conductores que hay personal trabajando en obras en la vía y evitar accidentes; o para informar sobre la proximidad a zonas de velocidad regulada como escuelas o áreas semipeatonales. También resulta de utilidad en la recolección de datos de tránsito de toda índole, con objetivos como la toma de decisiones e implementación de planes y leyes de movilidad, evolución de usuarios en determinado tramo de una vía o detectar cambios en la tasa de flujo o el volumen vehicular. Los usos más generalizados son para la pacificación del tránsito y la advertencia de peligros en las vialidades.

En la Figura 5.6, se muestra el Radar Pedagógico registrador de datos PVEL VMS que posee un indicador o pantalla tricolor (verde, ámbar y rojo), con capacidad para mensajes cortos y alimentación variada mediante energía solar, móvil o red eléctrica. Fácil de configurar mediante su conexión a una PC y posee la posibilidad de emitir un flash de destello. El radar pedagógico PVEL VMS posee un software que permite determinados estudios de tráfico y la exportación de datos en formato Excel para obtener algunos gráficos de relación entre variables.

Figura 5.6. Radar Pedagógico registrador de datos PVEL VMS



Fuente: Adaptado de Radar pedagógico PVEL-TEXT. Quadrex. <https://www.quadrex.es/>

Radar multicarril para intersecciones

Estos radares son usados en la detección de vehículos en intersecciones de varios carriles, usando como zona de referencia la línea de detención. Detectan vehículos y bicicletas tanto en movimiento como detenidos, con un alcance de hasta 70 m en equipos avanzados. Al ser no intrusivos, su instalación es cómoda y fácil, además de trabajar en cualquier condición climática con alta fiabilidad.

Son una solución muy práctica para recolectar datos para la gestión de intersecciones, implementándose rápidamente y sin grandes requerimientos. Pueden ser colocados y configurados sin interrumpir el flujo regular de las vialidades, por ser no intrusivos y de alta precisión.

En la Figura 5.7, se aprecia un Radar multicarril para intersecciones, el TMB-134 que puede ser configurado hasta para nueve áreas de detección, variando su posición, tamaño y función. También tiene la posibilidad de ser usado para la detección de presencia. Se coloca a 8 m de la línea de detención, en el lado opuesto a la zona de medición; posee dimensiones de 68 x 99 x 151 mm con una banda de frecuencia entre 76 y 77 GHz. Este dispositivo puede realizar la detección de vehículos a una distancia de hasta 70 m. Garantiza una opción rentable y fácil de instalar comparada con los bucles inductivos tradicionales usados en la gestión de intersecciones de más de un carril.

Figura 5.7. Radar multicarril para intersecciones TMB-134



Fuente: Adaptado de Radar multicarril para intersecciones TMB-134. Quadrex. <https://www.quadrex.es/>

Detectores no intrusivos de intercepción Tipo Doppler para semáforo

Este radar se emplea para detectar los vehículos que se colocan en la línea de detención y los que se acercan al cruce, aunque estén en movimiento. Este dispositivo emplea tecnología de efecto Doppler y sustituye de forma excelente al menos dos lazos en una intersección. Es versátil y de diseño compacto, muy fácil en su instalación y operación, con una buena eficiencia debido a que no es intrusivo y puede ser instalado sin interrumpir el flujo de vehículos. Es un detector de vehículos compatible con los reguladores instalados en semáforos actualmente, con una distancia de detección de hasta 40 m, mediante el empleo de lazos virtuales para vehículos detenidos y en aproximación. Es capaz de detectar también bicicletas y motocicletas, por lo que es aplicable a sistemas IoT y Smart City. Su empleo extendido es en el control de intercepciones, activación de señales y control temporal.

En la Figura 5.8, se muestra el detector no intrusivo para intercepciones semaforizadas RAD-TMA122. Este dispositivo posee un radar de microondas con banda K 24.125GHz con un alcance de hasta 40 m. Se monta a una altura de 4 a 5 m y puede detectar hasta un rango de 110 km/h, con dimensiones generales de 70 x 100 x 170 mm, lo que le da una gran portabilidad.

Figura 5.8. Detectores no intrusivos para intercepción semaforizada RAD-TMA122



Fuente: Radar de intersecciones RAD-TMA122 doppler para semáforo. Quadrex. <https://www.quadrex.es/>

Contadores no intrusivos de bicicletas

El aforador contador de bicicletas se emplea para gestionar el flujo de bicicletas y recolectar datos sobre los ciclistas, como el número de ciclistas y sus patrones de comportamiento. Recolecta además datos de velocidad de los ciclistas; estos contadores en su mayoría pueden almacenar los datos en una SD local o mediante comunicación alterna, enviarlos a un servidor. Son dispositivos que pueden trabajar en condiciones climáticas agresivas, no necesitan especialización para su conexión u operación, cuentan con una precisión que oscila entre 90 y 98 %, dependiendo del fabricante.

En la Figura 5.9, se observa un ejemplo de los Aforadores contadores de bicicletas ICOMS TMA-3B3, que posee detección en ambas direcciones con un sistema de protección al ambiente IP65. Este dispositivo puede trabajar a temperaturas entre -20 y 60° C, con una fuente de alimentación de 12 V y un panel solar integrado para usar energía renovable. Su peso es de 3.1 kg y esto lo convierte en un dispositivo ligero y portátil con facilidad para su manejo y operación. Trabaja con una banda K de frecuencia de 24.165 a 24.235 GHz.

Figura 5.9. Aforadores contadores de bicicletas ICOMS de efecto Doppler TMA-3B3



Fuente: Adaptado de *Aforador contador de bicicletas ICOMS TMA-3B3*. Quadrex. <https://www.quadrex.es/>

Detector no intrusivo de vehículos parados (lazos virtuales)

Estos equipos son usados para la detección automática de incidentes en la vía, así como para la recolección de datos de tráfico y control de intersecciones. Usan una combinación de cámaras de vídeo inteligentes y software especializado en administración inteligente del tránsito. Estos sistemas envían una alarma al operador de la zona, ubicado en centros de monitoreo y control del tránsito al instante de ocurrido un evento vial. Lo realiza casi en tiempo real, superando por mucho a los sistemas tradicionales de vigilancia, y realiza estas acciones muchas veces antes de que el operador pueda notar el incidente o sus consecuencias. La tecnología de análisis de vídeos de estos sistemas recopila datos del tránsito con rapidez y eficiencia, reemplazando la necesidad de los antiguos bucles inductivos. La tecnología se basa en la combinación precisa de vídeos de alta calidad con software de procesamiento de imágenes. Estos sistemas permiten facilidad de montaje sin intrusión en la carretera, evitando el cierre de carriles o roturas en la superficie de las vías.

En la Figura 5.10, se muestra el SMART CAM-P vídeo sensor para intersecciones, el cual emplea tecnología de análisis de video enfocadas a la presencia y detección de colas en las intersecciones. Poseen sensores de vídeos de alta calidad combinados con algoritmos de detección; de esta manera, la SMART CAM-P permite la detección robusta y precisa de vehículos gracias a la eficiencia del algoritmo empleado.

El SMART CAM-P video sensor para intersecciones tiene alcance para diez zonas de detección y monitoreo hasta en cuatro carriles. Puede realizar su trabajo sin importar el nivel de iluminación y las condiciones climáticas, realizando la detección de forma robusta y precisa. Con apoyo de los algoritmos puede ser configurado para realizar operaciones lógicas entre bucles virtuales, dando como resultado autodiagnósticos elaborados mediante la integración de funciones.

Figura 5.10. Vídeo sensor de detección para intersecciones



Nota. Fuente: Adaptado de SMART-CM-P video sensor para intersecciones. Quadrex. <https://www.quadrex.es/>

Detectores no intrusivos-Video Sensor de Tráfico

Es usado para la extracción de diferentes datos de un flujo de vehículos en determinadas vialidades en tiempo real. Este dispositivo basa su sistema en el análisis de imágenes de vídeo, básicamente es un sistema de vídeo detección. Este es usado como reemplazo de los detectores tipo lazo inductivo, siendo más eficientes, más precisos por su avanzado sistema de vídeo sensores. Los bucles inductivos se instalan en el asfalto y son considerados métodos de medición invasivos por lo que poseen muchas restricciones, a diferencia del sensor de tráfico, elimina estas restricciones mejorando la calidad de sus mediciones en las vialidades. Estos sensores son de bajo costo y de fácil montaje, por lo que se convierten en una excelente opción para estudios de vialidades.

Los sensores de tráfico pueden ser usados directamente para sustituir los lazos inductivos en el asfalto. La obtención de datos del tránsito de este dispositivo va hacia el cálculo de volumen o tasa de flujo, ocupación de la vía, determinación de distintos tipos de velocidades, también permite clasificar a los vehículos según normas establecidas.

En la Figura 5.11, se muestra la XCam-1D, la cual pertenece al grupo de sensores de tráfico y posee un soporte de montaje y un poste extensible para adaptarse a diferentes condiciones, lo que facilita su instalación y operación

en campo. La Xcam-TD garantiza una fácil configuración y ajuste de las zonas de detección mediante un ordenador portátil. Este sensor permite ser instalado en estaciones maestras de tiempo continuo dando una comunicación variada en campo usando protocolos avanzados y fáciles de personalizar. Xcam-TD™ se comunica con cualquier equipo en campo a través de protocolos de comunicación avanzados y personalizados.

Figura 5.11. Vídeo sensor detector inalámbrico



Fuente: Adaptada de Videosensor XCam-TD. Quadrex. <https://www.quadrex.es/>

De forma general las ventajas de los sensores de tráfico se pueden resumir en:

- Presentan un bajo consumo de energía.
- Realizan las comunicaciones por medios inalámbricos.
- Se integran de manera sencilla y compatible con sistemas anteriores.
- Son de fácil instalación sin necesidad de especialización para ello.
- Tienen capacidad de obtener vídeo y almacenar datos de tráfico local y, a su vez, transmitirlos en tiempo real.

En esta sección solo se usan algunos ejemplos de sistemas que pueden ser usados en aforos y conteos de peatones y vehículos motorizados y no motorizados, pero la lista puede ser extensa por la gran variedad de tecnologías existentes con este fin.

Metodología para estimar el TDPA

El caso más sencillo de su estimación es cuando se considera lo siguiente:

El TDPA y el TDPS presentan una distribución de tipo normal, por lo que la gráfica corresponde a una distribución de probabilidad conocida, con forma de campana simétrica alrededor de las medias. La diferencia máxima entre la media muestral y la media poblacional define el intervalo de confianza, en el cual puede estar la media poblacional.

Con base en lo anterior, podemos expresar el TDPA como:

$$TDPA = TDPS \pm A$$

donde:

A - máxima diferencia entre las medias

El tránsito promedio diario semanal (**TDPS**) se calcula a partir de la fórmula siguiente:

$$TDPS = \frac{\sum_{i=1}^7 TD_i}{7}$$

donde:

TD - tránsito diario

La máxima diferencia entre las medias puede ser obtenida a partir de $A = kE$

donde:

k - constante de desviaciones estándar, correspondiente al nivel de confiabilidad deseado

E - Error estándar de la media para poblaciones finitas

Se ha comprobado que medias de diferentes muestras de la misma población que distribuyen normalmente, tienen desviación estándar equivalentes al error estándar (E). Por lo antes planteado, podemos saber que el error estándar de la media (**E**) es igual al estimador de la desviación estándar poblacional ($\hat{\sigma}$), por lo tanto, se puede obtener el error a partir de:

$$\hat{\sigma} = E = \frac{S}{\sqrt{n}} \left(\sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \right)$$

donde:

S - desviación estándar muestral

N - tamaño de la población (números de días del año)

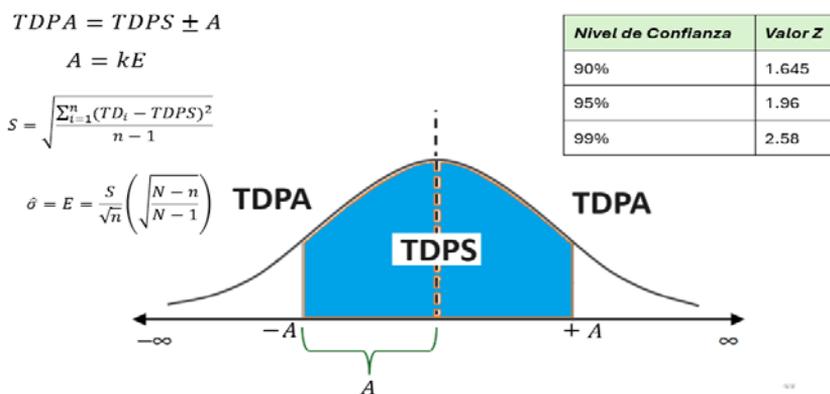
n - tamaño de la muestra (número de días donde se efectuó el conteo)

La Desviación estándar de la muestra se obtiene a partir de la fórmula siguiente:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TD_i - TDPS)^2}{n-1}}$$

En la Figura 5.12, aparece gráficamente representada la campana de una distribución normal, donde se especifica el área que representa el intervalo de confianza (zona color azul). La línea central es el tránsito diario promedio semanal y a los lados se encuentra la amplitud $\pm A$.

Figura 5.12. Resumen estadístico para la estimación del TDPA



Fuente: Autores.

DETERMINACIÓN DEL TDPA MEDIANTE LA DISTRIBUCIÓN T-STUDENT

Un método novedoso es planteado por Pérez (1999), para la estimación del TDPA con base en la obtención de la t-Student, la cual explicaremos en esta sección. Cabe destacar que William Sealy Gosset desarrolló la prueba y la distribución t y la realizó usando el seudónimo de estudiante (Student). La distribución de probabilidad surge del problema de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño y la desviación estándar poblacional es desconocida (Student, 1908). Esta prueba se usa con frecuencia en las publicaciones médicas indexadas nacionales e internacionales y se han observado errores consistentes (*The New England Journal of Medicine, Lancet y British Medical Journal*), (Fagerland, 2012).

Este método, que garantiza la estimación del TDPA, está basado en la premisa que, ante un estudio, inicialmente no se dispone de la media ni la varianza poblacionales. Si el TDPS y la S^2 , son la media y la varianza muestral insesgada, respectivamente, que se supone fue obtenida de manera aleatoria en una semana para una muestra normal, tenemos:

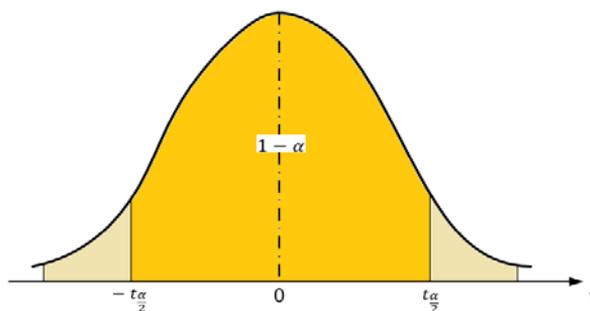
$$t = \frac{TDPS - TDPA}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$$

Para una distribución t-Student con n-1 grados de libertad, se debe de tener en cuenta que el intervalo t-Student es mayor que el de una distribución normal y se determina mediante la expresión siguiente:

$$TDPS - t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq TDPA \leq TDPS + t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

En la Figura 6.1, se muestra cómo, a partir del intervalo de confianza $1 - \alpha$, es fácil obtener el valor del $t_{\frac{\alpha}{2}}$.

Figura 6.1. Estadística de distribución t-Student



Fuente: Autores.

Ajuste y expansión para volúmenes de tránsito a nivel urbano

Lo ideal para conocer el volumen de tránsito de determinada autopista o carretera es mediante el aforo o conteo vehicular continuo. Este procedimiento es muy preciso y efectivo a la hora de analizar y determinar parámetros importantes para la construcción de nuevas vías, mejoramiento de la infraestructura existente, rehabilitación, mantenimiento rutinario y mantenimiento periódico. Para lograr un aforo continuo prolongado se debe contar con estaciones maestras de aforos permanentes. La instalación de estaciones de conteo permanente por tiempo prolongado requiere de muchos recursos tecnológicos y humanos que encarecen sobremanera la operación. Por esta razón, se opta por métodos de ajuste y expansión de ajuste y expansión de volúmenes de tránsito. Estos métodos son usados por varios investigadores e ingenieros en transporte, para lograr estimar el comportamiento de variables y parámetros en el flujo vehicular.

El tránsito tiende a tener variaciones de estado cíclicas y al implementar los métodos correctos pueden ser predecibles. Una correcta y eficiente clasificación de las vías y aforos de calidad, permite establecer un patrón básico de variación del volumen de tránsito. Conociendo el comportamiento de los volúmenes, los cuales pueden diferir en gran medida en ciertos periodos de tiempo, hay parámetros que son de vital importancia para la interpolación, como

la proporción. La proporción permite aumentar el rango de interpolación y mejora la predicción del volumen para vías de características similares, ya que en el tiempo permanece constante y consistente.

AJUSTE Y EXPANSIÓN PARA VOLÚMENES DE TRÁNSITO A NIVEL URBANO

Los métodos de ajuste y expansión del volumen vehicular presentan varias metodologías para su desarrollo, que parten del principio básico de obtener la proporción, que garantiza determinar factores para lugares con comportamientos similares y con aforos relativamente cortos.

Fórmula general para el cálculo de proporción:

$$P = \frac{TH}{TD}$$

donde:

P - proporción

$$TD_M = \sum_{i=1}^{24} TH_{M_i}$$

donde:

TD_M - tránsito diario en la estación maestra

TH_{M_i} - tránsito horario en la estación maestra para una hora específica (i)

La proporción se calcula hora a hora, es decir para todas las horas medidas.

$$P_{M_i} = \frac{TH_{M_i}}{TD_M}$$

donde:

P_{M_i} - proporción en estación maestra para una hora específica (i)

$$TD_1 = \frac{TH_{1j}}{P_{M_j}}$$

donde:

TD_1 - tránsito diario en estación de cobertura principal

TH_{1j} - tránsito horario en estación de cobertura principal para una hora en la que se tienen datos empíricos medidos en el conteo

P_{Mj} - proporción diaria en estación maestra para la misma hora tomada para TH_{1j}

Podemos adaptar la fórmula anterior con un despeje para determinar en la estación de cobertura el tránsito horario, pero en una hora para la cual no se tienen datos empíricos de conteo:

$$TH_{1i} = TD_1 * P_{Mi}$$

donde:

TD_1 - tránsito diario en estación de cobertura principal

TH_{1j} - tránsito horario en estación de cobertura principal, para una hora en la que no se tienen datos empíricos

P_{Mj} - proporción de la estación de prueba correspondiente a la misma hora seleccionada para TH_{1j}

Al unificar las ecuaciones y sustituyendo queda de la siguiente forma:

$$TH_{1i} = \frac{TH_{1j}}{P_{Mj}} \cdot P_{Mi}$$

Finalmente, se puede obtener en la estación de cobertura principal, el tránsito diario a partir de la fórmula:

$$TD_1 = \sum_{i=1}^{24} TH_{1i}$$

AJUSTE Y EXPANSIÓN PARA VOLÚMENES DE TRÁNSITO A NIVEL RURAL

El ajuste más usado en el nivel rural está basado en convertir aforos de 24 horas de un día y mes específico a volúmenes de tránsito promedio diario, combinando información histórica de la vía en estudio, con la expresión siguiente:

El tránsito diario promedio (TDP) se obtiene a partir de multiplicar el tránsito diario (TD)

$$TDP = TD_i * FM_m * FD_a$$

donde:

TD_i - tránsito diario del aforo de 24 horas

FM_m - factor de ajuste mensual

FD_a - factor de ajuste diario

El FM_m se obtiene usando la expresión siguiente:

$$FM_m = \frac{TDPA}{TDPM_m}$$

donde:

$TDPM_m$ - tránsito diario promedio en el mes específico del conteo

El FD_a se obtiene usando la expresión siguiente:

$$FD_a = \frac{TDPS}{TD_a}$$

donde:

TD_a - tránsito diario en el día específico del conteo

EJEMPLO

A continuación, vamos a mostrar mediante un estudio, la aplicación del ajuste y la expansión para volúmenes de tránsito a nivel rural. Para el estudio se dispuso de un archivo documental donde se recuperó un aforo vehicular realizado en la avenida Hueyontly en el poblado de Santa Catarina del Monte del municipio Texcoco en el Estado de México. En la Tabla 6.1, se muestra el volumen de tránsito mensual durante todo el año 2012, destacando el mes de octubre con un tránsito mensual (τ_m) de 370,057 vehículos.

También se analizó un aforo semanal en el año 2016, realizado del día 2 al 8 del mes de octubre en la misma carretera. Con el objetivo de poder realizar el cálculo del tránsito promedio diario (TDP), a partir de usar los factores de ajuste diario y mensual, se realizó un conteo continuo para conocer el tránsito diario por 24 horas, y el día seleccionado fue el viernes 6 de octubre de 2023 con un $TD_i = 1,324$ vehículo, coincidiendo con uno de los días ya obtenidos en la semana del 2 al 8 de octubre, pero del año 2016. Los datos recolectados en su

totalidad para las diferentes etapas en la estimación del TDP están mostrados en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Aforo vehicular en carretera rural de Santa Catarina del Monte

Mes	Año 2012			Semana del 2 al 8 de octubre de 2016	
	días	<i>TM</i>	<i>TDPM</i>	día	<i>TD</i>
Enero	31	317,227	10,233.129	Lunes	1,278
Febrero	29	309,593	10,675.621	Martes	1,083
Marzo	31	331,293	10,686.871	Miércoles	1,014
Abril	30	360,507	12,016.900	Jueves	1,079
Mayo	31	347,710	11,216.452	Viernes	1,389
Junio	30	312,639	10,421.300	Sábado	1,009
Julio	31	364,535	11,759.194	Domingo	1,102
Agosto	31	354,488	11,435.097	TOTAL	7,954
Septiembre	30	339,404	11,313.467	<i>TDPS</i>	1,136.286
Octubre	31	370,057	11,937.323		
Noviembre	30	362,655	12,088.500		
Diciembre	31	411,871	13,286.161		

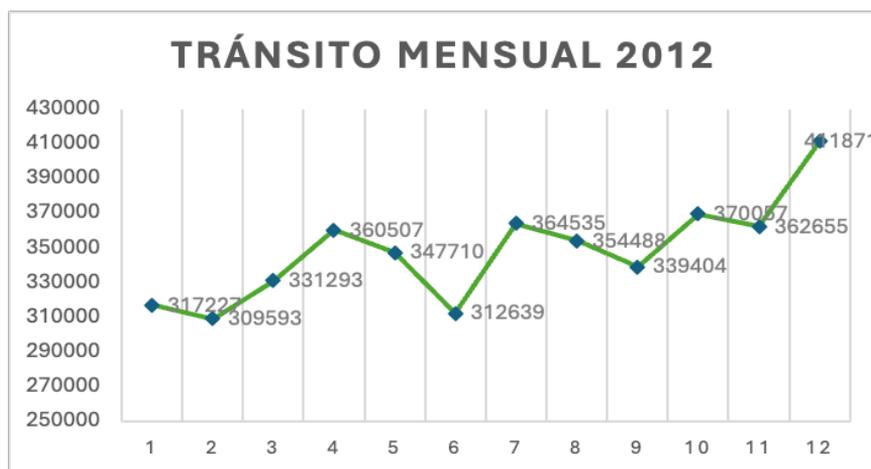
Fuente: Autores.

El TD_i (tránsito diario del aforo de 24 horas) realizado el 6 de octubre de 2023, alcanzó un valor de 1324 vehículos. Realizando los cálculos indicados en la metodología de ajuste y expansión para volúmenes de tránsito a nivel rural, se determinó que el factor de ajuste mensual fue de 0.957 y el factor de ajuste diario de 1.053. El tránsito promedio diario anual (TDPA) en el año específico del

conteo alcanzó el valor de 1,1426.172 vehículos. El tránsito promedio diario semanal (TDPs) en la semana del 2 al 8 de octubre de 2016 alcanzó el valor de 1,136.286 para un total de 7954 vehículos en el conteo de la semana, el TDPM usado para efecto de los cálculos fue el correspondiente al mes de octubre con un valor de 11937.323 vehículos; finalmente, se obtuvo un tránsito promedio diario (TDP) estimado de 1,334.590 vehículos.

Después de la estimación del TDP se realizaron algunas gráficas que permiten un desglose comparativo de los cálculos y estimaciones con los datos medidos empíricamente en el conteo. La gráfica de la Figura 6.2, muestra la variación del flujo vehicular a partir del tránsito diario, donde el mes 12 (diciembre) presenta el máximo valor con 411,871 vehículos. El mes de febrero mostró un TM más bajo con un valor de 309,593 vehículos está muy cerca al mes de junio que alcanzó valores de 312,639 vehículos.

Figura 6.2. Tránsito mensual del año 2012 en la carreta rural de Santa Catarina del Monte



Fuente: Autores.

Volumen Horario de Máxima Demanda

También es posible determinar otros factores y parámetros a partir de los conteos y aforos vehiculares. El Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD) corresponde al volumen vehicular que ocurrió en un intervalo de una hora en un periodo de medición de 24 horas, y que a su vez tiene el máximo valor. La hora en la que ocurre ese volumen máximo, se conoce como hora pico.

El Factor Horario de Máxima Demanda (FHMD), es un indicador de las características del flujo de tránsito en el periodo máximo. Cuando el valor se acerca a 1, es porque el flujo es más uniforme; en cambio, cuando se acerca a 0 es porque hay concentración de flujos máximos. El FHMD se determina con la expresión:

$$FHMD = \frac{VHMD}{n * Q_{15m\acute{a}x}}$$

donde:

n - número de intervalos dentro de la hora de máxima demanda

$Q_{15m\acute{a}x}$ - volumen máximo experimentado en 15 minutos

Volumen de servicio: Máximo volumen de vehículos que puede transitar sobre una carretera en un lapso de 1 hora:

$$VS = \frac{VHMD}{FHMD}$$

EJEMPLO

A modo de ejemplo se expondrá en la Tabla 6.2, un aforo vehicular realizado en dos horas del día comenzando a las 7 y terminando a las 9 de la mañana. Con este aforo se realizarán los cálculos necesarios para obtener el Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD), el Factor Horario de máxima demanda (FHMD) y el volumen de servicio. La existencia de vehículos pesados y movimientos hacia la derecha o a la izquierda, hace necesario introducir factores de ajustes. Estos factores reconocen o toman en cuenta las diferentes características físicas y operacionales de los vehículos. En este estudio se consideró un factor de ajuste de 1 para automóviles (A), 2 para autobuses (B) y camiones de dos ejes (C2), mientras que para el resto se usa un factor de 2.5.

Tabla 6.2. Aforo vehicular de dos horas consecutivas en ambos sentidos de circulación

Ubicación: Carretera 1												
Período de aforo: 7:00 a.m – 9:00 a.m												
Fecha: 21 de mayo 2023												
Orientación y movimiento: Sur-Norte (Ambas direcciones)												
Hora	Tipo de vehículos					Subtotal			Subtotal Por hora	Vehículos equivalentes	Equivalentes por hora	Volumen acumulado
	A	B	C2	C3	T2S1	T2S2	T3S2	T2S2R2				
7:00-7:15	46	5	16	1	9	2	1	0	80		121	121
7:15-7:30	54	7	12	3	12	4	2	1	95	359	147	268
7:30-7:45	36	7	0	1	11	1	2	1	59		90	358
7:45-8:00	92	9	9	2	5	6	2	0	125		166	524
8:00-8:15	82	8	2	4	3	6	1	0	106		137	540
8:15-8:30	86	10	6	2	7	3	1	2	117	430	156	549
8:30-8:45	63	11	8	1	6	3	1	1	94		131	566
8:45-9:00	91	6	3	1	6	2	3	1	113		142	566
TOTAL	550	63	56	15	59	27	13	6	789		1,090	

Fuente: Autores.

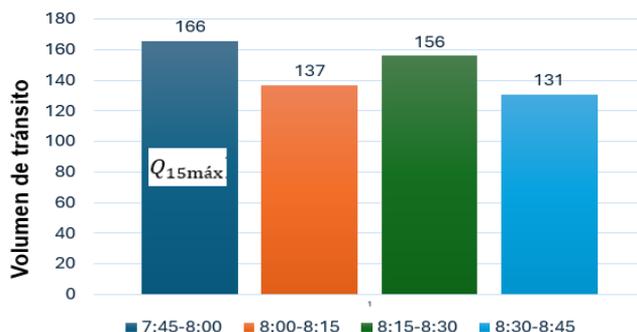
En la Tabla 6.2, se observa que pasaron un total de 789 vehículos en todas las categorías; bajo el criterio factor de ajuste por vehículo equivalente se obtiene un total de 1,090 vehículos. Para este total de vehículos equivalentes, se realiza un análisis donde se determina que la hora comprendida entre 8:00-9:00 a.m. experimentó el mayor volumen de vehículos con un valor de 566, mientras que de 7:00-8:00 a.m. fue menor con un valor de 524 vehículos equivalentes.

Para la selección de vHMD existen varios criterios que son empleados dependiendo del tipo de estudio; en este caso en que se realizó una medición continua de dos horas lo conveniente es realizar una columna de volumen equivalente acumulado. La columna de volumen acumulado permite obtener

el valor mayor (590 vehículos), y este valor es usado como v_{HMD} . A partir de este valor y para efectos de cálculo se toman los volúmenes de vehículos equivalentes correspondiente a los cuatro intervalos inmediatos superiores (7:45-8:00 con 166; 8:00-8:15 con 137; 8:15-8:30 con 156; 8:30-8:45 con 131).

Teniendo determinado el v_{HMD} , podemos ver en la Figura 6.3, los cuatro intervalos que componen la hora de máxima demanda, observando que el intervalo de mayor volumen es el de 7:45-8:00, con un volumen de 166 vehículos equivalentes. Usando la expresión de cálculo para determinar F_{HMD} mediante el cociente entre el v_{HMD} y la multiplicación del número de intervalos dentro de la hora en estudio (n) y el volumen máximo de los intervalos en estudio ($Q_{15máx}$), finalmente se obtuvo un valor de 0.88,855,422 quedando F_{HMD} igual a 0.89.

Figura 6.3. Volumen de tránsito por intervalos dentro de la hora de máxima demanda

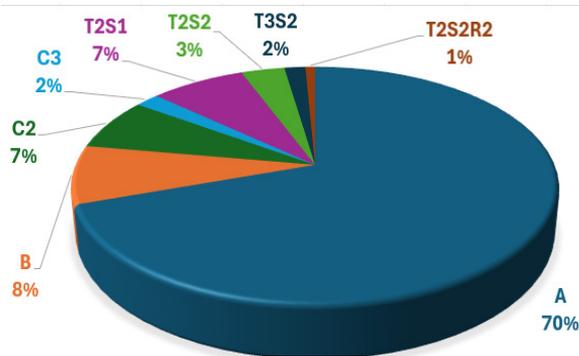


Fuente: Autores.

El máximo volumen de vehículos que puede transitar sobre una carretera en un lapso de una hora se obtiene a partir del cociente entre el v_{HMD} y el F_{HMD} . Para el caso en estudio, el v_s nos dio un valor de 636 vehículos equivalentes.

Otro dato de interés que puede ser extraído de un aforo o conteo vehicular se muestra en la Figura 6.4, donde se aprecia la composición vehicular detectada. Claramente se aprecia que 70 % de los vehículos tienen clasificación A (automóviles), mientras que la menor presencia la tuvo el vehículo de tipo T2S2R2 con 1 por ciento.

Figura 6.4. Composición vehicular durante las dos horas de conteo vehicular



Fuente: Autores.

El proceso elemental mostrado con anterioridad es la base para determinar los niveles de servicio y otras valoraciones de interés en las vialidades. Apoyados en el “Manual de Capacidad Vial” de la SCT y con el procedimiento anterior, donde se expuso con claridad la obtención del Volumen Horario de Máxima Demanda (VHMD), el Factor Horario de Máxima Demanda (FHMD) y el Volumen de Servicio (vs), es viable la obtención de los N.S y las velocidades de operación.

Pronóstico de Volumen de tránsito futuro

Antes de entrar en contexto, es preciso destacar y dejar claros algunos conceptos relacionados con la tasa de flujo vehicular.

VOLUMEN HORARIO MÁXIMO ANUAL (VHMA)

Este parámetro es de gran interés cuando se desea contar con información precisa del volumen de tránsito en un largo periodo de tiempo. El VHMA está definido como el máximo número de vehículos que pasa en una hora por una sección transversal de la vía en un tiempo de estudio de un año. Dicho con otras palabras, se toma la hora de mayor tránsito dentro de todas las horas del año (8,760 h).

VOLUMEN HORARIO DÉCIMO (10 VH), VIGÉSIMO (20 VH), TRIGÉSIMO ANUAL (30 VH)

Este término tiene gran relevancia porque señala volúmenes horarios específicos que poseen una posición relevante. El volumen horario décimo anual (VHDA) es el que en cantidad de vehículos solo es excedido por el volumen de tránsito de otras nueve horas analizado para un año de estudio. De igual manera, el volumen horario vigésimo (VHVA) es el que en cantidad de vehículos solo es excedido por el volumen de tránsito de otras 19 horas analizado para un año de conteo. El volumen horario trigésimo anual (VHTA) es el que en cantidad de vehículos solo es excedido por el volumen de tránsito de otras 29 horas analizado para un mismo año de aforo.

VOLUMEN HORARIO DE PROYECTO (VHP)

Este volumen, como su nombre lo indica, está asociado con el diseño y la proyección de una nueva vialidad y es usado para determinar sus características y dimensiones. Este volumen se estima teniendo en cuenta varios criterios, entre ellos, el factor económico y la inversión. Pudiéramos pensar por su importancia que sería correcto diseñar los parámetros geométricos de una vía basándose en el VHMD e igual el volumen de proyecto a este valor, pero sería un error categórico. Se considera un error, porque este volumen no es frecuente y tendríamos un diseño sobredimensionado de la vía, implicando en la construcción costos muy elevados. Por las consideraciones anteriores y con base en experiencias nacionales e internacionales, se toma como volumen de diseño o proyecto, el valor del VHTA.

CLASIFICACIÓN DE LOS PROYECTOS DE TRÁNSITO

El volumen de tránsito futuro relaciona dos aspectos que fundamentan su empleo, el volumen de tráfico normal actual en el momento del estudio y el incremento que debe experimentar la vialidad.

Los proyectos de tránsito se clasifican en las siguientes categorías:

- a. Proyectos de construcción: En este caso, se consideran todas las obras que implementan infraestructuras nuevas o cuando se trabaja en modificaciones de una carretera existente en un tramo mayor a 30 % del total de la vía.
- b. Proyectos de mejoramiento: Cambio de especificaciones y dimensiones; en este caso, son necesarias pequeñas adecuaciones y requieren de construcción e implementación de nuevas infraestructuras.
- c. Proyecto de rehabilitación: Tiene como objetivo fundamental la reconstrucción de una vialidad o la recuperación de sus características técnicas y cumplir con la función para la que fue creada.
- d. Proyecto de mantenimiento rutinario: Esta conservación de las vías posee un carácter continuo y se realiza en periodos menores a un año. En este caso, se consideran las intervenciones de emergencia para dar condiciones óptimas a la vía y el trabajo en zonas laterales.
- e. Proyecto de mantenimiento periódico: Son actividades de conservación, que se realizan con intervalos de tiempo indeterminados entre tres y cinco años; tienen como objetivo recuperar la capa de rodadura o la capa superficial de la vía.

TRÁNSITO FUTURO

El pronóstico del tránsito futuro (TF) se realiza empleando la ecuación siguiente:

$$TF = TA + IT$$

donde:

TA - tránsito actual

IT - incremento del tránsito (que se espera al terminar la etapa)

El T_F es la suma entre los volúmenes de tránsito actual y su incremento futuro.

TRÁNSITO ACTUAL

El tránsito actual (**TA**) es la demanda que tendrá la carretera mejorada en caso de un mantenimiento o una nueva vialidad, a la hora de comenzar a operar. En el caso de mejoramiento de una vialidad ya existente, el tránsito actual está formado por el tránsito existente (T_E) antes de la reparación, al cual se le suma el tránsito atraído (T_{At}), usando la fórmula:

$$TA = TE + TAt$$

Para el caso particular de la estimación del tránsito actual en carreteras nuevas podemos decir que $TE = 0$, por lo que la expresión quedaría como: $TA = TAt$, que solo con la obtención del tránsito atraído sería igual al tránsito actual.

El Tránsito Atraído (T_{At}) o Tránsito Desviado, cuando se construye una nueva vialidad provoca una atracción de nuevo tránsito vehicular. Este tránsito no surge de la nada, es desviado de otras carreteras.

INCREMENTO DEL TRÁNSITO ESPERADO

El incremento del tránsito esperado al final de cada etapa (**IT**) se determina por la expresión:

$$IT = CNT + TG + TD$$

El Crecimiento Normal del Tránsito (**CNT**), es producto del desarrollo poblacional y de la urbanización. De forma general, las comunidades al paso del tiempo aumentan su progreso y, por ende, provocan en la región un aumento de tránsito vehicular.

Tránsito generado (**TG**), es el tránsito que aparece producto de vehículos totalmente nuevos y viajes que antes se efectuaban. Está compuesto por trán-

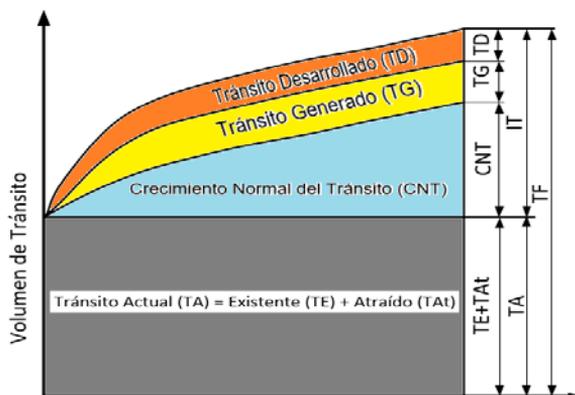
sito inducido, tránsito convertido y tránsito trasladado. Por lo general, le corresponden tasas de crecimiento entre el 5 y 25 % del **TA** (Cal *et al.*, 2007).

El **TG** está compuesto por:

- *Tránsito Inducido*: Viajes que son nuevos y no efectuados por ningún vehículo con anterioridad.
- *Tránsito Convertido*: Los viajes nuevos que con anterioridad eran efectuados por modos de transporte como taxi, autobús, avión o tren y debido a la vialidad recién construida, ya se realizan en vehículos privados.
- *Tránsito Traslado*: Viajes que se realizaban a otros destinos, pero por la ventaja de la nueva vialidad y por sus características y atracción, se trasladan a esta. (Ejemplo, creación de autopistas o peajes que acercan a los usuarios a centros comerciales similares y más cercanos).
- *Tránsito Desarrollado (TD)*: Es aquel provocado por las condiciones de la vialidad, en virtud del progreso y el desarrollo del suelo, producido por las ventajas de la nueva vialidad. Básicamente, se le atribuye al aumento del volumen de tránsito por las mejoras en el suelo adyacente a la vialidad en cuestión. Este es visible varios años después del inicio de funcionamiento de la carretera y le corresponde 5 % del Tránsito Actual (**TA**). (Cal, y Mayor *et al.*, 2007).

En la Figura 6.5, se observa la relación entre los diferentes volúmenes de tránsito y cómo están compuestos gráficamente en función del Tránsito Futuro.

Figura 6.5. Elementos componentes del volumen de tránsito futuro



Fuente: Adaptado de "Componentes del volumen del tránsito futuro", en Cal *et al.* (2007), p. 205.

Factor de Proyección (FP): este debe ser estimado en el futuro. Para el caso particular de proyectos donde se construyen nuevas carreteras con duración de 20 años, por lo general emplean un rango de entre 1.5 y 2.5:

$$FP = \frac{TF}{TA}; TF = FP * TA$$

Sustituyendo tenemos que:

$$FP = \frac{TA + IT}{TA} = \frac{TA + CNT + TG + TD}{TA}$$

Finalmente nos queda:

$$FP = 1 + \frac{CNT}{TA} + \frac{TG}{TA} + \frac{TD}{TA}$$

El método que más se emplea para la proyección de tránsito (TC), incluye el empleo de la ecuación siguiente:

$$TC = \left[\left(\frac{TPDA_i}{TPDA_0} \right)^{1/n} \right] - 1$$

donde:

$TPDA_i$ - tránsito promedio diario anual del año actual

$TPDA_0$ - tránsito promedio diario anual del año base

n - diferencia de años

Capítulo 7

Estadística



Generalidades

En los diferentes estudios que pueden ser realizados en Ingeniería del Transporte, específicamente en Ingeniería de Tránsito, se hace necesaria la recolección de datos en campo. En otros casos es necesario la realización de mediciones experimentales; dicha información debe ser procesada y analizada con el empleo de métodos estadísticos, solo así tendrán valor científico.

En este capítulo se exponen los principales métodos estadísticos que pueden ser aplicados en Ingeniería de Tránsito, partiendo de la determinación del tamaño de muestra adecuado para un nivel de confianza aceptable. Se explica el proceso para la obtención de una tabla de frecuencia, con sus respectivos histogramas. Asimismo, se establecen las principales medidas de tendencia central, el método de determinación e interpretación, dependiendo del tipo de estudio.

Determinación del número de muestra

El número o tamaño de la muestra es la cantidad de individuos u observaciones que se emplean en un estudio, la correcta determinación del tamaño muestral garantiza la representatividad de la población en el estudio segmento.

Por tal razón, es conveniente determinar un tamaño de muestra ideal, ya que debe ser lo suficientemente grande para que represente las características de la población y permita una inferencia correcta. Sin embargo, este no debe ser demasiado grande para evitar un gasto innecesario de recursos a la hora de la toma de muestras en campo, evitando encarecer la investigación.

El tamaño de muestra se determina teniendo en cuenta varios aspectos, como el tipo de variable (cuantitativa o cualitativa) y el tipo de población (finita o infinita). Para el caso que nos ocupa en este libro y por la propia naturaleza de la Ingeniería de Tránsito, se trabajará con poblaciones finitas y variables cuantitativas.

Para determinar el número se deben de emplear las ecuaciones siguientes:

Para población infinita:

$$n = \frac{Z^2 S^2}{e^2}$$

Para población finita:

$$n = \frac{NZ^2 S^2}{(N - 1)e^2 + Z^2 S^2}$$

donde:

N - tamaño de la población

S - desviación estándar muestral

e - límite aceptable de error muestral

Z - parámetro estadístico asociado al nivel de confianza

Según: Mateu & Casal (2003), la varianza se determina mediante la formulas siguientes:

Para una población:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n}$$

Para una muestra:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n - 1}$$

La desviación estándar se determina:

Para una población:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n}}$$

Para una muestra:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

El error (e) de la muestra es la desviación permitida entre los parámetros determinados de una muestra, que estiman el valor poblacional y los valores reales de dicha población. Los errores tienden a ser mayores cuando menos representativo es el espacio muestral (Ross, 2007; Fernández, Sánchez, Córdoba & Largo, 2002).

Intervalo y nivel de confianza

INTERVALO DE CONFIANZA

Según Irala, Fernández-Crehuet & Serrano (1997), el intervalo de confianza en estadística es un intervalo aproximado de los posibles valores que puede tomar un parámetro muestral para ser estimado en la población. Esta estimación o el tamaño del intervalo va a depender del nivel de confianza que se establezca.

El cálculo del intervalo de confianza depende de los siguientes factores:

- El tamaño de la muestra, del cual depende la precisión con que se puede conocer cuándo se acerca el valor de determinado parámetro a la hora de su estimación.

- El margen de error es de gran importancia a la hora de obtener el intervalo de confianza, ya que es un indicativo de la probabilidad existente de que el parámetro a estimar está fuera del intervalo señalado.
- El nivel de confianza da a conocer el porcentaje de los casos donde el valor poblacional del parámetro a estimar está dentro del intervalo.

El intervalo de confianza se determina mediante la expresión siguiente:

$$P\left(\bar{X} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * Z_{\frac{\alpha}{2}} < \mu < \bar{X} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * Z_{\frac{\alpha}{2}}\right) = 1 - \alpha$$

donde:

\bar{X} - media muestral

σ - desviación típica o estándar de la población

n - número de muestra

$Z_{\frac{\alpha}{2}}$ - valor tipificado que deja a la derecha $\frac{\alpha}{2}$ (valor crítico)

α - nivel de significancia

μ - media poblacional

En el caso que la varianza población sea desconocida es necesario usar la expresión siguiente para obtener el intervalo de confianza (García, Pascual, Frías, Van Krunckelsven & Murgui, 2008):

$$P\left(\bar{X} - \frac{S}{\sqrt{n}} * t_{\frac{\alpha}{2}} < \mu < \bar{X} + \frac{S}{\sqrt{n}} * t_{\frac{\alpha}{2}}\right) = 1 - \alpha$$

donde:

$t_{\frac{\alpha}{2}}$ - distribución t de Student de $n - 1$ grados de libertad con probabilidad $\frac{\alpha}{2}$,

S^2 - desviación típica o estándar de la muestra

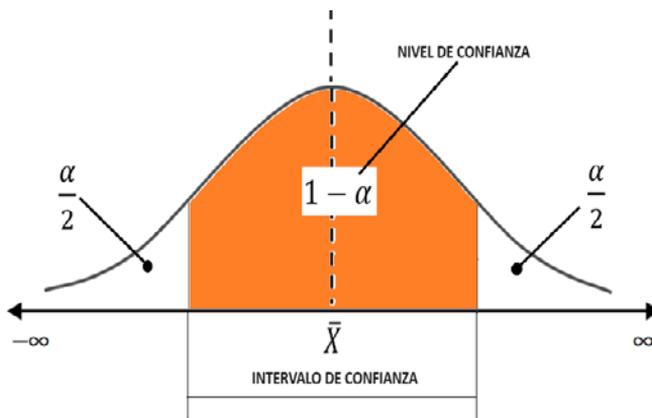
NIVEL DE CONFIANZA

El nivel de confianza expresa el éxito que posee el intervalo de confianza en estimar la media de determinado parámetro; es decir, el porcentaje de probabilidad de que la media del parámetro estimado esté dentro del intervalo. Los niveles de

confianza más usados están entre 95 a 99 %. Un nivel de confianza de 99 % significa que, en el intervalo de confianza, estará 99 veces de cada 100 estudios en el valor verdadero de la media del parámetro estimado. Por lo general, el nivel de confianza se expresa en porcentaje de la forma $1 - \alpha$, (Tauber, 2001).

En la Figura 7.1, se observa una distribución normal donde gráficamente se observa el área que cubre el intervalo de confianza alrededor de la media y los espacios.

Figura 7.1. Distribución de probabilidad con intervalo y nivel de confianza



Fuente: Autores.

Tablas de frecuencia

La tabla de frecuencia tiene un uso muy difundido en la Ingeniería de Tránsito como el caso de Campoverde Borja (2017), el cual realiza modelos para predecir el tráfico vehicular y lo fundamenta en principios estadísticos. García (2010), realiza un análisis en determinada vialidad, donde emplea principios descriptivos de los estadísticos en la ciudad de Bogotá, con buenos resultados. Hernández & González (2021), logra procesar datos de estaciones dinámicas de medición con el empleo de la estadística y su aplicabilidad en el área de Ingeniería de Tránsito.

Cuando se dispone de muchos datos con un rango muy amplio, algo que sucede en la práctica, durante el estudio de volúmenes de tránsito y recopilación de datos de campo así como cuando se trabaja con muchas observaciones, es conveniente organizar la información y reducirla mediante el empleo de una tabla de frecuencia.

También es importante reducir y organizar los datos en una tabla de frecuencia cuando poseen variables sensibles a la no-respuesta. Cuando la enumeración de los datos individuales da muchos valores y la frecuencia es cero, es imposible observar la distribución o las tendencias centrales de los datos. Para estos casos, la tabla de frecuencia debe ser en intervalos y, por tanto, la tabla de distribución es para datos agrupados.

Las tablas de frecuencia permiten organizar la información de una muestra, facilitan la realización de gráficas estadísticas y la obtención de manera fácil de las medidas de tendencia central para llegar a conclusiones concretas y aceptadas.

En la Figura 7.2, se muestran los elementos que componen una tabla de frecuencia para datos agrupados; en la primera columna se colocan los intervalos de clase. Los intervalos de clase se determinan a partir de conocer el rango (R) mediante la expresión: máximo mínimo:

$$R = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$$

El número de intervalos se determina aplicando la Regla de Sturges, la cual es un criterio usado con frecuencia en estadísticas para obtener con precisión el número de clases o intervalos necesarios para representar gráficamente un conjunto de datos. Esta regla fue establecida en 1926 por el matemático alemán Herbert Sturges y se determina mediante la expresión siguiente (Llinás & Rojas 2015):

$$K = 1 + 3.322 \log (n)$$

Después se obtiene la amplitud (A) como:

$$A = \frac{R}{K}$$

Los intervalos están formados por un límite inferior (L_i) y un límite superior (L_s) y lo que separa a ambos límites es la amplitud. Para empezar a colocar los intervalos se toma como límite inferior el valor de $X_{\text{mín}}$, después se le suma la amplitud para establecer el límite superior del primer intervalo. Posteriormente, se toma el límite superior del primer intervalo para formar el límite inferior del segundo, al cual se le suma la amplitud para repetir el proceso.

La segunda columna es la marca de clases (M) que se obtiene por la expresión:

$$M = \frac{L_i + L_s}{2}$$

En la tercera columna, se ubica la Frecuencia Absoluta Simple (f_i), la misma se obtiene buscando en el total de datos de la muestra (n), cuántos valores están en cada uno de los intervalos.

La cuarta columna, Frecuencia Absoluta Acumulada (F_i), se completa con la suma consecutiva de la columna de frecuencias absoluta simple (f_i).

La quinta columna corresponde a la Frecuencia Relativa simple (h_i) y se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$h_i = \frac{f_i}{n}$$

La sexta columna pertenece a la Frecuencia Relativa Acumulada (H_i), se completa con la suma consecutiva de la columna de Frecuencias Relativa Simple (h_i).

En algunas ocasiones, dependiendo del tipo de estudio, se agrega una séptima columna para representar en su forma porcentual la Frecuencia Relativa Simple.

Figura 7.2. Modelo para tabla de distribución de frecuencia

Intervalos	Marca de clase	FRECUENCIA ABSOLUTA		FRECUENCIA RELATIVA	
		Simple	Acumulada	Simple	Acumulada
$[,]$	x_i	f_i	F_i	h_i	H_i

Fuente: Autores.

HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA

Las tablas de frecuencia facilitan la obtención de histogramas de frecuencia. El histograma es una gráfica de barras que, en estos casos, se emplea para mostrar el resultado de una distribución de frecuencia. Podemos decir que no es más que información de la tabla de frecuencia expresada gráficamente, donde cada barra es una clase y la altura es la frecuencia absoluta. Es decir, en el eje de las abscisas se coloca cada clase y en el eje de las ordenadas las frecuencias absolutas que dan la altura de cada barra.

Para la obtención de conclusiones precisas, cuando se trabaja con una cantidad elevada de datos, la tabla de frecuencia es de gran ayuda, pues permite realizar el histograma de frecuencia, lo que facilita la visualización del fenómeno y su mejor comprensión.

La importancia de un histograma de frecuencia radica en que resume gran cantidad de datos con respecto a su frecuencia, organizados en conjuntos o intervalos, siendo su análisis visualmente más atractivo. En un histograma es más sencillo realizar un resumen, ya que permite apreciar de forma gráfica los valores y sus agrupaciones, así como su comparación con facilidad.

Otra ventaja de los histogramas radica en que, en la presentación de análisis y resultados ante un equipo de trabajo, son mucho más fáciles de explicar que una tabla de frecuencia.

El histograma de frecuencia es una poderosa herramienta y es atractiva visualmente para la comunicación y la transmisión de información. Nuestro cerebro no es capaz de analizar y procesar grandes cantidades de datos de forma precisa. Sin embargo, el uso de histogramas de frecuencia facilita al cerebro humano hacer una interpretación rápida y explícita.

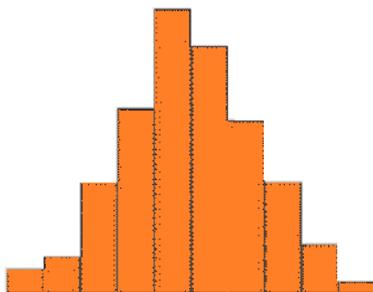
El histograma nos permite entender gráficamente tres fenómenos en el conjunto de datos:

- *Centralidad*: Nos da la tendencia central de los datos, permitiendo conocer su distribución en torno a la posición central.
- *Rango*: Identifica los valores máximos y mínimos y la forma en la que se distribuyen los datos.
- *Simetría*: Nos muestra de manera visual la frecuencia con la que se repiten los valores, qué simetría presenta la gráfica y lo aislado o raro de diferentes valores.

El propósito de un histograma está en mostrar la distribución de una muestra o población, según sea el caso. El histograma ordena y facilita la visualización de la distribución de los datos. Esto lo realiza haciendo énfasis en la posición del valor central y cómo se distribuyen el resto de los datos en torno a este valor central. Sin embargo, es importante saber que existen diferentes tipos de histogramas, estos se mostrarán a continuación.

Histograma de frecuencia simétrico

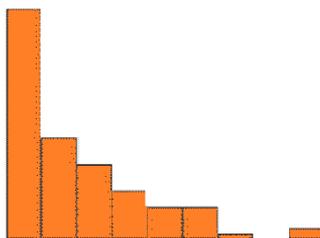
Este tipo de histogramas, conocidos también como unimodal, se centran en la media, y sus características se basan en la distribución de la media y el tamaño de la desviación estándar. Básicamente, este histograma arroja una distribución de tipo normal, con forma de campana simétrica (Figura 7.3). Estas curvas simétricas con forma de campana se distinguen porque las observaciones equidistantes del máximo central poseen el mismo valor de frecuencia.

Figura 7.3. Histograma de frecuencia con forma simétrica

Fuente: Autores.

Histograma de frecuencia de derecha sesgada

Un histograma es sesgado a la derecha cuando los valores presentan una menor frecuencia, también conocido como modelo de cola derecha. Básicamente, este tipo de gráfica se da cuando al movernos a la derecha del eje de las abscisas, la frecuencia disminuye, por lo que el tamaño de las barras va disminuyendo progresivamente, como se aprecia en la Figura 7.4.

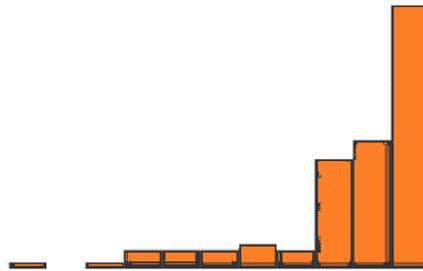
Figura 7.4. Histograma de frecuencia de derecha sesgada

Fuente: Autores.

Histograma de frecuencia de izquierda sesgada

Se conoce como histogramas de izquierda sesgada (Figura 7.5), aquellos donde la mayor frecuencia de los valores altos está a la derecha. En este caso, en la medida que nos movemos sobre el eje de las abscisas hacia la izquierda, el tamaño de las barras disminuye, ubicando a la izquierda los datos que presentan menor frecuencia absoluta. Por tanto, este gráfico muestra una gran falta de simetría con respecto a la media.

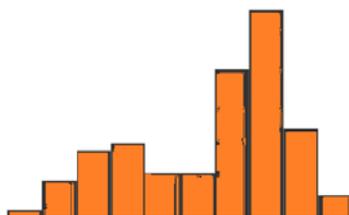
Figura 7.5. Histograma de frecuencia de izquierda sesgada



Fuente: Autores.

Histograma de frecuencia bimodal

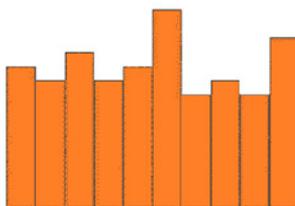
En este caso, obtenemos un gráfico como se muestra en la Figura 7.6, donde aparecen dos picos en diferentes posiciones que sobresalen del resto de los intervalos. Este comportamiento de los datos es muy fácil de distinguir visualmente, además carece totalmente de simetría.

Figura 7.6. Histograma de frecuencia bimodal

Fuente: Autores.

Histograma de frecuencia de meseta aplanada

Este fenómeno que se presenta en datos específicos de una muestra o población es conocido como efecto meseta. El mismo se detecta visualmente cuando los datos representados en un histograma de frecuencia nos muestran barras que poseen alturas muy similares entre sí (Figura 7.7). Es decir, la diferencia entre el tamaño de las barras es mínima, donde las frecuencias de las clases son muy parecidas. Esto sucede gracias a que las distribuciones están juntas, pero poseen medias diferentes.

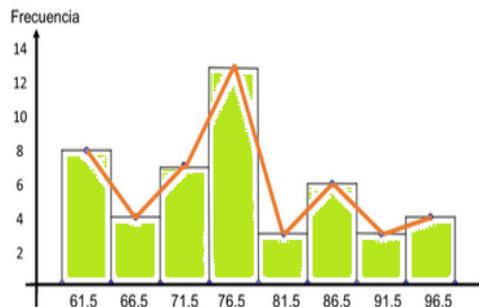
Figura 7.7. Histograma de frecuencia de meseta aplanada

Fuente: Autores.

Ojivas suavizadas o curvas de frecuencia

Los datos que se trabajan en este tipo de estudios son de una muestra que trata de representar una población grande. Según la teoría estadística, en una población es posible realizar un gran número de observaciones. Para casos de datos continuos de una población, conceptualmente tendría sentido seleccionar intervalos de clases muy pequeños y que contengan observaciones en cada una de las clases para que nos arrojen un polígono de frecuencia con un gran número de barras pequeñas. De este modo, al unir la parte superior del centro de cada una de esas pequeñas barras por segmentos de líneas, aparecen los denominados polígonos (Figura 7.8).

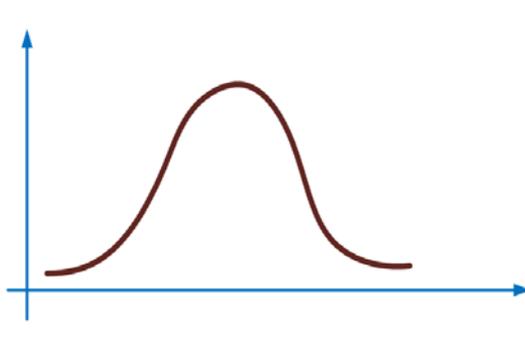
Figura 7.8. Histograma de frecuencia con polígonos de frecuencia



Fuente: Autores.

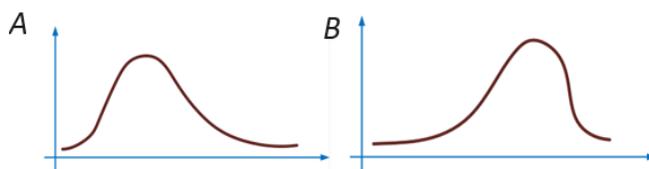
Los polígonos pueden ser aproximados a una curva teórica, cuando esta se suaviza. Estas curvas resultantes son llamadas ojivas suavizadas. Al igual que en el caso de los histogramas de frecuencia también aparecen distintos tipos de ojivas suavizadas o curvas de frecuencias (Walpole, Myers & Myers, 1999).

Las principales o más conocidas curvas de frecuencia se muestran en la Figura 7.9, son las de tipo simétricas o acampanadas. Son aquellas donde las observaciones se encuentran equidistantes del máximo central y tienen la misma frecuencia.

Figura 7.9. Curva de frecuencia suavizada simétrica o acampanada

Fuente: Autores.

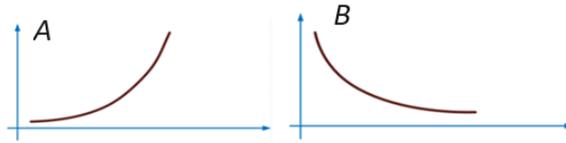
En la Figura 7.10, se muestra en la sección A una curva asimétrica a la derecha (asimetría positiva), y en la sección B una curva asimétrica a la izquierda (asimetría negativa). Básicamente, si la cola más larga está a la derecha, se dice que la curva es asimétrica a la derecha o que tiene asimetría positiva. Se dice que la curva es asimétrica a la izquierda, o que tiene asimetría negativa si ocurre lo contrario al caso anterior.

Figura 7.10. Sección A, Curva asimétrica positiva; Sección B, Curva asimétrica negativa

Fuente: Autores.

También suele suceder o podemos encontrar algunas curvas como aparecen en la Figura 7.11, donde en la sección A tenemos una curva en forma de J; en la sección B es una curva de J inversa. Estas curvas en forma de J se caracterizan ambas por tener el máximo en uno de los extremos.

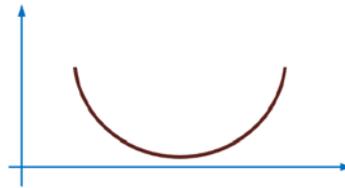
Figura 7.11. Curva de frecuencia suavizada tipo J



Nota. Sección A curva en forma de J; Sección B curva de J inversa. Fuente: Autores.

Asimismo podemos observar en la Figura 7.12, una curva en forma de U, caracterizada por presentar los máximos valores de frecuencia en los extremos.

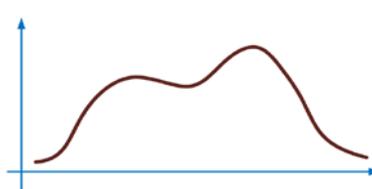
Figura 7.12. Curva de frecuencia suavizada tipo U



Fuente: Autores.

En la Figura 7.13, se muestra un ejemplo de curva bimodal donde se distinguen dos máximos o dos picos de frecuencia.

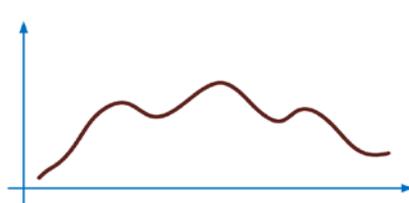
Figura 7.13. Curva de frecuencia suavizada bimodal



Fuente: Autores.

Otro tipo de curvas es la representada en la Figura 7.14, esta curva se conoce como curva de frecuencia multimodal, y se distingue por tener dos o más picos de frecuencia.

Figura 7.14. Curva de frecuencia suavizada multimodal



Fuente: Autores.

Medidas de tendencia central

Los valores típicos o medidas de tendencia central se distribuyen centralmente dentro de un conjunto de datos ordenados de acuerdo con su magnitud. En general informan cuál es el centro en torno al cual se ubica un conjunto de datos (Batanero, 2000).

Cuando se trabaja con muchos datos, como es el caso de los análisis en Ingeniería de Tránsito, donde se requiere realizar conteos continuos por largos periodos de tiempo, es preferible usar medidas de tendencia central para describir los datos. Estos parámetros estadísticos representan con cierta precisión la ubicación del centro de los datos, siendo geoméricamente una posición de mucha relevancia. El contar con estas medidas nos garantiza poder resumir todos los datos de una muestra o población, en un solo valor que nos da la idea del comportamiento de toda la información contenida, en un conjunto numeroso de datos mediante una visión generalizada.

Las medidas de tendencia central son la media aritmética, la mediana, la moda, la media geométrica y la media armónica.

MEDIA ARITMÉTICA

La media de un conjunto de números se determina según Mc Leod & Barón (1999):

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \cdots \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{j=1}^N X_j}{N}$$

donde:

X_i - dato de estudio

N - número de datos

Si los números $X_1, X_2, X_3, \dots \dots \dots X_K$ aparecen $f_1, f_2, f_3, \dots \dots \dots f_K$ veces, respectivamente, la media aritmética se convierte en:

$$\bar{X} = \frac{f_1 X_1 + f_2 X_2 + f_3 X_3 + \cdots \dots + f_K X_K}{f_1 + f_2 + f_3 + \cdots \dots + f_K} = \frac{\sum_{j=1}^N f_j X_j}{\sum_{j=1}^N f_j} = \frac{\sum_{j=1}^N f_j X_j}{K}$$

En algunos casos, los datos numéricos objeto de estudio se asocian a ciertos factores de ponderación que podemos llamar $W_1, W_2, W_3, \dots \dots \dots W_K$, dependiendo de la significación o importancia dada a los números. Quedando la expresión como se muestra a continuación:

$$\bar{X} = \frac{w_1 X_1 + w_2 X_2 + w_3 X_3 + \cdots \dots + w_K X_K}{w_1 + w_2 + w_3 + \cdots \dots + w_K} = \frac{\sum_{j=1}^N w_j X_j}{\sum_{j=1}^N w_j}$$

La suma de las desviaciones de un conjunto de números con relación a su media aritmética es igual a un valor nulo. A su vez, la suma de los cuadrados de las desviaciones de un conjunto de números X_i de "a" es un mínimo en los casos donde $a = \bar{X}$.

Por lo tanto:

$$\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - a)^2}{N}$$

si y solo si $a = \bar{X}$. Entonces nos queda que:

$$\frac{\sum_{j=1}^N (X_j - a)^2}{N} = \frac{\sum (X^2 - 2aX + a^2)}{N} = a^2 - 2a \frac{\sum X}{N} + \frac{\sum X^2}{N}$$

Quedando demostrado que la expresión es un mínimo cuando $a = \frac{\sum X}{N}$.

MEDIANA

La mediana de un conjunto de números ordenados de forma ascendente o descendente es el valor medio o la media aritmética de los valores centrales. Dicha medida deja 50 % de los datos por debajo y la otra mitad por encima.

La mediana M_e se obtiene como se muestra en la Figura 7.15, que aparece a continuación:

Figura 7.15. Cálculo de la mediana para muestras pares e impares

$$Me = \begin{cases} x_{((n+1)/2)} & \text{si } n \text{ es impar} \\ \frac{x_{(n/2)} + x_{((n/2)+1)}}{2} & \text{si } n \text{ es par} \end{cases}$$

Nota. Fuente: Autores.

Para el caso de datos agrupados, la mediana se puede determinar mediante la interpolación a través de:

$$Mediana = L_1 + \left(\frac{\frac{N}{2} - (\sum_{j=1}^K f_j)}{f_{mediana}} \right) c$$

donde:

L_1 - límite de clase real inferior de la clase mediana (es decir, la clase que contiene la mediana)

N - número de datos observados (es decir frecuencia total)

$(\sum_{j=1}^K f_j)_1$ - suma de las frecuencias de todas las clases inferiores a la clase mediana

$f_{mediana}$ - frecuencia de la clase mediana

c - tamaño del intervalo de clase de la mediana

MODA

Para datos agrupados donde se obtiene la curva de frecuencia a partir de los polígonos, la moda es el valor o los valores que corresponden el punto máximo de la curva. Básicamente la moda es el valor que presenta mayor frecuencia (número que más se repite). La moda se obtiene por la expresión siguiente:

$$Moda = L_1 + \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_1 + \Delta_2} \right) c$$

donde:

L_1 - límite de clase real inferior de la clase modal (es decir, que contiene la moda)

Δ_1 - exceso de la frecuencia modal sobre la frecuencia de la clase inferior más próxima

Δ_2 - exceso de la frecuencia modal sobre la frecuencia de la clase superior más próxima

c - tamaño del intervalo de clase modal

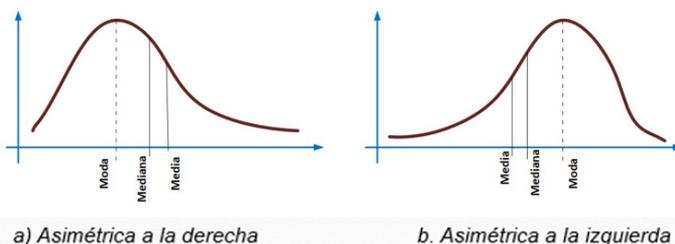
RELACIÓN EMPÍRICA ENTRE LA MEDIA, LA MEDIANA Y LA MODA

En el caso de curvas de frecuencia unimodales, que se distinguen porque presentan un máximo local distintivo, se puede aplicar la expresión de relación siguiente:

$$Media - Moda = 3(Media - Mediana)$$

En una gráfica que muestra la curva de frecuencia se puede ubicar la posición relativa de la media, la mediana y la moda como se observa en la Figura 7.16. En el caso de curvas de tipo simétricas la media, la moda y la mediana están en la misma posición ya que es el mismo valor.

Figura 7.16. Curvas de frecuencias asimétricas



Fuente: Autores.

MEDIA GEOMÉTRICA

La media geométrica (G) de un conjunto de valores de n números $X_1, X_2, X_3, \dots, \dots, X_n$, es la n ésima raíz del producto de los números:

$$G = \sqrt[n]{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot \dots \cdot X_n}$$

La media geométrica es muy utilizada cuando se comparan parámetros que poseen características muy diferentes y se expresan en unidades de medidas que no son compatibles y proporcionan diferentes rangos numéricos.

La media geométrica se puede entender mediante la analogía siguiente: partiendo de dos números X_1 y X_2 , los cuales su media es la longitud de uno de los lados de un cuadrado. Podemos considerar que el área del cuadrado mencionado es igual al área de un rectángulo con lados de longitudes X_1 y X_2 . De la misma forma, podemos decir que tres números X_1 , X_2 y X_3 , es la longitud de la arista de un cubo, cuyo volumen es el mismo que el de un ortoedro de lados iguales a los tres números mencionados.

MEDIA ARMÓNICA

La media armónica (H) de un conjunto de n números $X_1, X_2, X_3, \dots, \dots, X_n$, es el recíproco de la media aritmética, de los recíprocos de los números:

$$H = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{1}{X_j}}$$

Básicamente podemos entender y aplicar la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{H} = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{1}{X_j}}{N} = \frac{1}{H} \sum_{j=1}^N \frac{1}{X_j}$$

RELACIÓN ENTRE LAS MEDIAS ARITMÉTICA, GEOMÉTRICA Y ARMÓNICA

Las tres son medidas conocidas como pitagóricas, para cualquier conjunto de datos positivos que poseen como mínimo dos valores desiguales, la media armónica siempre es la menor de las tres medidas. La media aritmética es la mayor y la media geométrica ocupa el lugar central justamente en medio.

La media geométrica de un conjunto de valores que deben ser siempre positivos $X_1, X_2, X_3, \dots, \dots, \dots, X_n$ es menor o igual a su media aritmética, pero, a su vez, es mayor o igual a su media armónica. Básicamente lo antes expresado se puede expresar matemáticamente como:

$$H \leq G \leq \bar{X}$$

Los signos de igualdad se conservan solo para el caso de que los números sean idénticos.

RAÍZ MEDIA CUADRÁTICA

La raíz media cuadrática (*RMC*) de un conjunto de valores $X_1, X_2, X_3, \dots, \dots, \dots, X_n$ algunas veces se denota por $\sqrt{\bar{X}^2}$ y se determina mediante la expresión siguiente:

$$RMC = \sqrt{\bar{X}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N X_j^2}{N}}$$

Este promedio es usado muchas veces para el análisis de la velocidad en redes de transporte o en ciencias de Ingeniería del Transporte. Básicamente, es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones respecto a la media.

CUARTILES, DECILES Y PERCENTILES

Con anterioridad, en este capítulo estudiamos la mediana (M_e), que en esencia es la que divide a la mitad de un conjunto de datos ordenados, dejando 50 % de los datos por debajo de sí. A veces es necesario, para caracterizar y comprender el comportamiento de un parámetro, conocer no solo el punto medio sino otros puntos que resultan de interés. De este concepto nacen los cuartiles, deciles y percentiles, los cuales dividen un conjunto de datos en otros puntos de interés.

Expandiendo el concepto de ubicar una posición donde queden por debajo un grupo de valores, podemos pensar en una medida que divida el conjunto en cuatro partes iguales. Esta división es conocida como cuartiles.

CUARTILES

Los cuartiles son Q_1 , Q_2 y Q_3 , los cuales se conocen como primer, segundo y tercer cuartil, respectivamente. Bajo este criterio, si tenemos un conjunto de datos y se considera una escala porcentual, dividiendo los datos en cuatro partes (Figura 7.17) aparecen los tres cuartiles

donde:

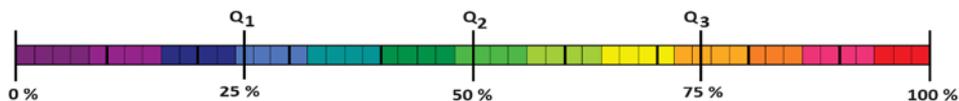
Q_1 - corresponde a la primera división y se ubicaría en 25 % de los datos (deja por debajo el 25 % de los datos)

Q_2 - corresponde a la segunda división y se ubicaría en 50 % de los datos, siendo igual a la mediana (deja por debajo 50 % de los datos)

Q_3 - y por último, la tercera división se ubicaría en 75 % de la escala (deja por debajo el 75 % de los datos)

Q_1 es la mediana de la mitad inferior de los datos ordenados y es la mediana de la mitad superior de los datos ordenado.

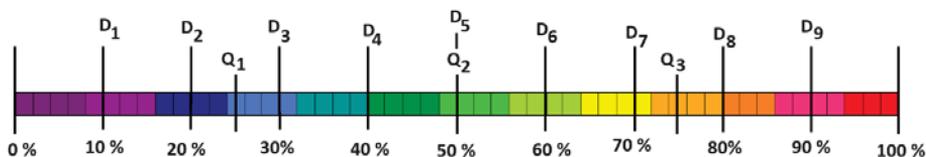
Figura 7.17. Cuartiles y su posición en la barra porcentual



Fuente: Autores.

Los deciles son los valores que dividen los datos en diez partes iguales y se denotan por $D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7$ y D_9 . En la Figura 7.18, se muestra la posición de los cuartiles observando que el Decil 5 (D_5) coincide con el cuartil 2 (Q_2), siendo ambos igual a la mediana, quedando por debajo de ellos 50 % de los datos.

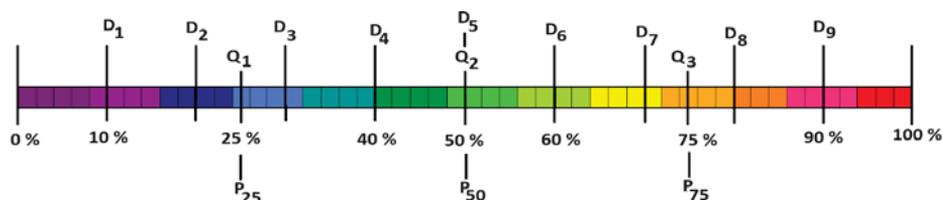
Figura 7.18. Deciles y su posición en la barra porcentual



Fuente: Autores.

Por último, podemos dividir los datos en 100 partes iguales y esto da origen a los denominados percentiles, que se denotan de la forma siguiente $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 \dots \dots \dots P_{99}$. Como se ve, el percentil en su índice indica exactamente el porcentaje de los datos en el cual se posiciona. En la Figura 7.19, se puede apreciar con claridad que el quinto decil, el segundo cuartil y el percentil 50 coinciden; estos, a su vez, corresponden a la mediana. Los percentiles 25 y 75 coinciden con el primer y tercer cuartil, respectivamente. (Misnaza, Roncancio, Peña & Prieto, 2016)

Figura 7.19. Percentil 25, 50 y 75, su posición en la barra porcentual



Fuente: Autores.

Procedimiento para el cálculo de los percentiles

Con las gráficas analizadas anteriormente, se puede deducir que a todos los deciles y cuartiles les corresponde un valor de percentil. Por lo tanto, calculando el percentil correcto, podemos hallar cualquier cuartil o decil. Tomando L_p como la posición del percentil tenemos:

$$L_p = (n) \frac{P}{100}$$

donde:

n - número de datos

P - percentil

Pasos para el cálculo del p -ésimo percentil

- Ordenar los datos de manera ascendente.
- Calcular el L_p .
- Si el L_p no es entero, se redondea al valor entero inmediato superior. Y ese es el resultado final del p -ésimo.
- Si el L_p es entero, el resultado del p -ésimo percentil, es el promedio de los datos ubicados en la posición n y $n + 1$.

Para el caso particular del estudio de velocidades dentro de la Ingeniería de Tránsito, los percentiles juegan un papel fundamental. El percentil 15 (P_{15}), representa dentro de un estudio el límite inferior de la velocidad, que está relacionada con la velocidad de los vehículos más lentos de la corriente

vehicular. El percentil 50 (P_{50}), determina la calidad del flujo vehicular en determinada vialidad, y se acerca al valor de la velocidad media obtenida en el estudio. El percentil 85 (P_{85}), es la velocidad crítica y, por ende, una medida usada como guía para establecer el límite máximo de velocidad. El percentil 98 (P_{98}), es usado como norma para establecer en determinadas vialidades la velocidad de proyecto.

En el caso de que los datos del estudio estén agrupados por intervalos se propone el siguiente método para determinar los percentiles 15, 50, 85 y 98. Como primer paso se debe ubicar el intervalo o la clase a la cual corresponde el percentil mediante la expresión siguiente:

$$L_p = \frac{P(n+1)}{100}$$

De esta manera, el percentil se ubicará en el intervalo donde la frecuencia absoluta sea la inmediata superior al valor de L_p obtenido. Ya conocido el intervalo al cual corresponde el percentil, se obtiene el valor preciso del percentil (P_k) mediante la ecuación:

$$P_k = L_i + \frac{\frac{P(n+1)}{100} - F_{i-1}}{f_i} \cdot A$$

donde:

L_i - límite inferior del intervalo en el cual se ubica el percentil

F_{i-1} - frecuencia absoluta acumulada del intervalo anterior

f_i - frecuencia absoluta del intervalo donde se encuentra el percentil

A - amplitud del intervalo

Medida de dispersión

Con anterioridad estudiamos las medidas de tendencia central, lo que nos garantiza conocer las propiedades del centro de un conjunto de datos. Las medidas centrales no dan información suficiente para describir un conjunto de forma adecuada. Esto se debe a que no tienen en cuenta la variabilidad entre los datos de un conjunto ni sus diferencias. Por lo que se hace necesario

conocer la dispersión entre los datos de una muestra o población, y esto se consigue evaluando el conjunto de datos a partir de las medidas de dispersión. Las medidas de dispersión nos dan a conocer si los datos se aglomeran estrechamente en torno a algún parámetro de interés o están demasiado esparcidos. Las medidas de dispersión expresan el grado de variabilidad de una variable estadística (Ruiz, Batanero & Estepa, 2017).

Las medidas de dispersión dan un valor que señala el nivel de variabilidad del conjunto de datos de interés. Los parámetros más importantes dentro de los que se consideran de dispersión son la desviación típica o estándar, la varianza, el rango, el coeficiente de variación, Desviación media, Recorrido semi-intercuartílico y Recorrido del percentil 10-90 (Ricardi, 2011).

RECORRIDO O RANGO

El recorrido ya fue estudiado cuando se trabajó el tema de tablas de frecuencias, por lo que no es necesario abundar mucho en su determinación. Dejando claro que el rango nos da la diferencia entre el valor máximo y mínimo de una muestra estadística o población en general.

DESVIACIÓN MEDIA, PROMEDIO O DESVIACIÓN ABSOLUTA

La desviación media de un conjunto de N números $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ se define por:

$$\text{Desviación Media} = DM = \frac{\sum_{j=1}^N |X_j - \bar{X}|}{N} = |\bar{X} - \bar{X}|$$

donde:

$|X_j - \bar{X}|$ - valor absoluto de la desviación de X_j ;

Si $X_1, X_2, X_3, \dots, X_K$ aparecen con frecuencias $f_1, f_2, f_3, \dots, f_K$ respectivamente, la desviación media puede ser escrita como:

$$\text{Desviación Media} = DM = \frac{\sum_{j=1}^K f_j |X_j - \bar{X}|}{N}$$

RECORRIDO SEMI-INTERCUARTÍLICO O DESVIACIÓN CUARTÍLICA

La desviación cuartílica se define como la diferencia entre el tercero y el primer cuartil, por la expresión siguiente:

$$R_1 = Q_3 - Q_1$$

R_1 nos dice con toda claridad que en él se encuentran 50 % de los valores de la distribución.

El recorrido semi-intercuartílico se obtiene por:

$$R_{SI} = \frac{Q_3 - Q_1}{2} = \frac{R_1}{2}$$

Esta es una medida de variabilidad que solo considera la mitad del recorrido intercuartílico.

RECORRIDO DEL PERCENTIL 10-90

Este recorrido se define por la ecuación:

$$\text{Recorrido del percentil } 10 - 90 = P_{90} - P_{10}$$

El recorrido del semi-percentílico 10-90, no es muy común y su uso es muy limitado:

$$\text{Recorrido semipercentilico } 10 - 90 = 1/2 (P_{90} - P_{10})$$

DESVIACIÓN ESTÁNDAR O TÍPICA

La desviación estándar de un conjunto de datos se determina como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

Si $X_1, X_2, X_3, \dots, \dots, \dots, X_n$ aparecen con frecuencia $f_1, f_2, f_3, \dots, \dots, \dots, f_K$, respectivamente, la desviación estándar se obtiene de la forma siguiente:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i (X_i - \bar{X})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n f_i X_i^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

Las desviaciones estándar para los datos de una muestra se definen en ocasiones como $n - 1$ en lugar de colocar n . En caso de que se tome un número de muestra muy grande, cercano al valor de la población, no habría diferencia entre una definición y otra.

PROPIEDADES DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR

Según Spiegel (1976), se puede considerar determinar la desviación estándar a partir de considerar una media aritmética $\bar{X} = a$ quedando de esta forma:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - a)^2}{n}}$$

Donde a es cualquier promedio además de la media aritmética. De todas esas desviaciones estándar la mínima es aquella en que $a = \bar{X}$.

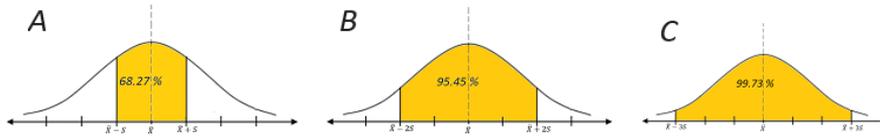
En el caso de distribuciones normales tenemos que:

El 68.27 % de los casos se encuentra a $\bar{X} - S$ y $\bar{X} + S$ (Figura 7.20, sección A).

El 95.45 % de los casos se encuentra a $\bar{X} - 2S$ y $\bar{X} + 2S$ (Figura 7.20, sección B).

El 99.73 % de los casos se encuentra a $\bar{X} - 3S$ y $\bar{X} + 3S$ (Figura 7.20, sección C).

Figura 7.20. Desviaciones estándar alrededor de la media según el intervalo



Fuente: Autores.

Si tenemos dos conjuntos de datos n_1 y n_2 o dos distribuciones de frecuencia con las frecuencias totales, también de n_1 y n_2 , tendremos varianzas de las muestras equivalentes a S_1 y S_2 respectivas y con la misma media aritmética. Entonces, podemos obtener una ecuación combinada entre ambos conjuntos de datos expresadas como:

$$S^2 = \frac{N_1 S_1^2 + N_2 S_2^2}{N_1 + N_2}$$

VARIANZA

La varianza de una muestra y de una población se representa como S_2 y σ^2 , respectivamente. La varianza de una muestra se determina usando la expresión siguiente (Argibay, 2011):

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

Capítulo 8

Capacidad y niveles de servicio



Generalidades

Para el estudio de la capacidad y los niveles de servicio, se toma como referencia lo planteado en el Manual de Capacidad de Carreteras (2010), por sus siglas en inglés, Highway Capacity Manual (HCM), publicado por la Junta de Investigación del Transporte, por sus siglas en inglés, Transportation Research Board (TRB), la cual es una división de la Academia Nacional de Ciencias, Ingeniería y Medicina de los Estados Unidos. El mismo establece procedimientos metodológicos para la estimación y la determinación de parámetros de acuerdo con el tipo de infraestructura y en tres niveles de aplicación.

Los niveles de análisis metodológico se describen a continuación:

Análisis operacional

Este análisis es capaz de proporcionar indicadores operacionales a partir de datos obtenidos en campo, para propiciar alternativas viables para su aplicación. Requiere un alto nivel de precisión y eficiencia, se enfoca en evaluar el efecto de medidas de corto y mediano plazo. Este análisis está orientado hacia mejoras en las infraestructuras viales que requieren poca inversión y se realizan con poco capital.

Dentro de los análisis operacionales se encuentran las modificaciones en la infraestructura para la redistribución de los carriles y sus usos; la instalación de dispositivos de control o *stt*; la modificación de un semáforo o su reprogramación en intersecciones; la ubicación y la colocación de estaciones pequeñas o paradas del transporte público; o incluso, la ampliación de un radio de giro en una curva horizontal.

Análisis de diseño o proyecto

Este nivel de análisis permite establecer las características físicas y geométricas apropiadas para que una infraestructura vial de nuevo funcionamiento o bien remodelada, pueda operar de forma adecuada a mediano y largo plazo. La precisión necesaria en este nivel puede ser intermedia, ya que se basa en atributos de diseño. Para esta etapa, la demanda futura del tránsito tendrá una influencia notable, por eso se requiere del uso de valores estandarizados y prefijados.

Los aspectos que son analizados van desde considerar el número de carriles necesarios; la consideración de carriles auxiliares o de retorno; el ancho de los carriles y calzadas; el análisis de las pendientes longitudinales; las dimensiones de banquetas y pasos, ya sean a nivel o superiores, etcétera.

Análisis de planeamiento

Este análisis está diseñado para crear estrategias a largo plazo, por lo que la precisión es muy baja, ya que no se dispone de datos exactos. La demanda de tránsito en este análisis es un parámetro del cual no se tiene mucha información, por lo que se recurre a datos estandarizados. Este análisis se enfoca en estudios de sistemas viales, ya sea en su totalidad o un segmento de él; estudio del impacto que puede tener determinada modificación en la vía o de forma general en las políticas sistémicas de movilidad y administración del tránsito.

Capacidad

Si definimos de forma simple el término de capacidad vial, podemos decir que es la cantidad de vehículos que se logra posicionar en una longitud determinada de la vía.

Las características que determinan la capacidad en una vía son su geometría, tipo de sección, pendiente, dimensiones de los carriles de circulación, la berma, las intercepciones semaforizadas, los movimientos y giros, composición vehicular típica de la sección y las velocidades establecidas o permitidas.

Según el HCM 2010, la capacidad en una vía depende del nivel de servicio que se desea o el que posee en caso de una carretera ya establecida.

Podemos decir que el flujo máximo del tránsito de determinada vía es igual a su capacidad. La hora pico es la más crítica y en ese momento la densidad también es crítica haciendo que la velocidad sea muy baja. La unidad de medida en la que se expresa la capacidad vial es vehículos/horas.

Un ejemplo de capacidades establecidas es el caso de carreteras de dos carriles, en las que se considera ideal, una capacidad de 2,800 vehículos/hora, considerando la no circulación de vehículos pesados en ambos sentidos.

CONDICIONES BASES O IDEALES

Se consideran condiciones ideales del tránsito, las siguientes:

- Flujos ininterrumpidos, sin interferencia lateral (vehículos o peatones)
- Ausencia de vehículos pesados
- Carriles en ambos sentidos de 3.6 m
- Consideración de altas velocidades de diseño
- La no existencia de restricciones
- Buena visibilidad de rebase

La capacidad ideal en condiciones reales se ve afectada por muchas condiciones, pero en especial se afecta por:

- La distribución del tránsito
- La importante relación entre el volumen y la capacidad
- Las condiciones constructivas de la vía, como geometría longitudinal y transversal
- El porcentaje de desbalance direccional en algunas zonas

Para determinar la capacidad vial se emplea la expresión (Transportation Research Board, 2010):

$$Sf = 2800 * \left(\frac{q}{C}\right) i * f_d * f_w * f_{HV}$$

donde:

Sf - capacidad vial para nivel de servicio i ;

$\left(\frac{q}{C}\right) i$ - relación razón de flujo y capacidad para niveles de servicio i ;

$\left(\frac{q}{C}\right)$ - radio de proporción de flujo

f_d - factor de distribución direccional

f_w - factor de ajuste por carriles y bermas estrechas

f_{HV} - factor de ajuste por vehículos pesados

Todos estos factores de ajuste se determinan según normas establecidas para el caso de la relación razón de flujo y capacidad $\left(\frac{q}{C}\right)$ de acuerdo con condiciones de tipo de terreno y zonas de no rebase. En la Tabla 8.1, se muestran los resultados para niveles de servicio D y E.

Tabla 8.1. Relación $\frac{q}{C}$, según tipo de terreno y zona de no rebase

Tipo de Terreno	N. S	% de zonas de no rebase					
		0	20	40	60	80	100
Plano	D	0.64	0.62	0.60	0.59	0.58	0.57
	E	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ondulado	D	0.62	0.57	0.52	0.48	0.46	0.43
	E	0.97	0.94	0.92	0.91	0.90	0.90
Montañoso	D	0.58	0.50	0.45	0.40	0.37	0.33
	E	0.91	0.87	0.84	0.82	0.80	0.78

Nota: Datos para niveles de servicio D y E. Fuente: HCM 2010.

En la Tabla 8.2, se muestra el radio de proporción de flujo y su relación con la velocidad a flujo libre.

Tabla 8.2. Relación $\frac{q}{C}$, según tipo de terreno y velocidad de flujo libre

Tipo de terreno	Velocidad a flujo libre	
	60 km/h	60 km/h
Plano	0.90	0.90
Ondulado	0.90	0.80
Montañoso	0.80	0.70

Fuente: Transportation Research Board, HCM 2010.

El radio de proporción de flujo ($\frac{q}{C}$) se expresa como un cociente entre la razón de flujo y la capacidad. Este radio expresa claramente si la capacidad vial propuesta o vigente satisface las condiciones de tránsito existentes. Por lo antes mencionado, un radio de proporción de flujo siempre debe ser menor o igual a 1, debido a la imposibilidad de una vía de poder tener una razón de flujo superior a la capacidad. Si en algún caso tenemos un valor superior o igual a 1, habrá congestión y no podrá operar la carretera. Por tal situación, se espera siempre un valor menor a 1, mientras más se acerca a cero este valor, indica que la carretera opera con comodidad y que está diseñada para capacidades superiores a las que circulan en dicha vialidad.

En la Tabla 8.3, se muestran los valores para el factor de distribución direccional, el cual posee una relación aproximadamente lineal y se establece a partir de la relación de proporcionalidad entre los vehículos que circulan en uno u otro sentido de la vía.

Tabla 8.3. Factor de distribución f_d , según la direccionalidad

Distribución direccional	f_d
50/50	1.00
60/40	0.94
70/30	0.89
80/20	0.83
90/10	0.75
100/00	0.71

Nota: Factor para algunos valores de proporcionalidad, para otros se debe estimar. D y E.

Fuente: Transportation Research Board, HCM 2010.

Factor de ajuste por carriles y bermas estrechas (f_w): según HCM, 2010 se determina mediante:

$$f_w = 0.278 * W + 0.147 * H - 0.279$$

donde:

W - ancho de carril

H - ancho de berma

El factor de ajuste por vehículo pesado (f_{HV}): este factor tiene en cuenta las características dimensionales y de peso de los vehículos en los cuales estas características poseen una influencia notable en la velocidad y maniobras en la vía (Tabla 8.4). Según el HCM, 2010 se obtiene el f_{HV} con la ecuación siguiente:

$$f_{HV} = \frac{1}{[1 + P_T * (E_T - 1) + P_B * (E_B - 1)]}$$

donde:

P_T - proporciones de camiones en el flujo vehicular

P_B - proporciones de autobuses en el flujo vehicular

E_T - factor equivalente para camiones en el flujo vehicular

E_B - factor equivalente para autobuses en el flujo vehicular

Tabla 8.4. Factor de equivalencia para vehículo pesados según el tipo de terreno

Tipo de vehículos	Tipo de terreno			
	Plano	Ondulado	Montañoso	Pendientes críticas
Camión	2.0	5.0	12.0	16.0
Ómnibus	1.6	2.9	6.5	10.0

Fuente: Transportation Research Board, HCM 2010.

La capacidad vial se afecta por la densidad, ya que la densidad es la cantidad de vehículos en una sección de la vía para un mismo instante de tiempo. La densidad determina el espaciamiento promedio entre varios vehículos, a densidades altas hay poco espaciamiento y, por ende, una disminución de la velocidad de los vehículos. Bajo estas condiciones es inevitable que se afecte el tiempo de recorrido y la capacidad de la vía.

Nivel de servicio

GENERALIDADES

El Manual de Capacidad de Carreteras 2010, plantea un total de seis niveles de servicios, los cuales van de la letra A hasta la F. El nivel de servicio (NS) o LOS (por sus siglas en inglés, Level Of Service), es una propiedad cualitativa de la vía, que nos da el rango de operación de las vialidades o de un tramo de una carretera en específico. Los factores cualitativos que se reflejan mediante el nivel de servicio son: la velocidad, el tiempo de recorrido, las paradas forzadas de la corriente vehicular, la libertad para maniobrar, la seguridad de la vía, la comodidad de conductores y pasajeros y muy importante, los costos de operación en los que incurren los conductores al circular por determinado tramo de la vía.

Una vía puede ser proyectada para un nivel de servicio, pero dicha vía experimentará diferentes niveles de servicio en diferentes horarios, con diferentes composiciones vehiculares y a diferentes volúmenes de tránsito.

Los niveles de servicio de las autopistas o carreteras se evalúan desde la A hasta la F; se dan a continuación, de forma general y con un enfoque sistémico, las características que distinguen a cada clasificación.

NIVEL DE SERVICIO A

La Figura 8.1 muestra una carretera con NS de tipo A, donde los usuarios analizados de forma individual no son afectados y están exentos de los efectos que pudiera provocar la presencia de otros vehículos en la corriente de flujo vehicular. El nivel global de confort y conveniencia que experimentan los conductores como usuarios de la vía es de excelente calidad.

- Velocidad de circulación a flujo libre.
- Velocidad de operación a 90 km/h o superior.
- Bajos volúmenes de tránsito.
- La demora que experimentan los conductores con respecto al total del tiempo de viaje es menor a 35 por ciento.
- La razón de flujo para las dos direcciones es de 490 veh/h, aproximadamente.

Figura 8.1. Vialidad con nivel de servicio tipo A



Fuente: Autores.

NIVEL DE SERVICIO B

En la Figura 8.2, se aprecia una vialidad con un ns tipo B, donde ya empiezan a verse otros vehículos y el nivel de confort y conveniencia es menor que en el nivel de servicio tipo A; el pequeño aumento de los vehículos que experimenta este nivel de servicio provoca cierto cambio en la conducta individual de los conductores presentes.

- Velocidad de circulación a flujo libre con algunos índices de restricción.
- Velocidad de operación de hasta 80 km/h.
- La demora que experimentan los conductores con respecto al total del tiempo de viaje es menor a 50 por ciento.
- La razón de flujo para las dos direcciones es de 780 veh/h, aproximadamente.

Figura 8.2. Vialidad con nivel de servicio tipo B



Fuente: Autores.

NIVEL DE SERVICIO C

La Figura 8.3 muestra una vía con ns de tipo C, donde se marca el comienzo del dominio en el que la operación de los usuarios de la vía se ve afectada de

forma significativa por la presencia de otros vehículos. El nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.

- Velocidad de circulación con cierto grado de restricción y algún grado de dificultad para maniobrar.
- El conductor no puede seleccionar con total libertad la velocidad de circulación.
- Velocidad de operación de hasta 70 km/h.
- La demora que experimentan los conductores con respecto al total del tiempo de viaje es menor a 65 por ciento.
- La razón de flujo para las dos direcciones es de 1190 veh/h, aproximadamente.

Figura 8.3. Vialidad con nivel de servicio tipo c



Fuente: Autores.

NIVEL DE SERVICIO D

La Figura 8.4 muestra una vía con ns de tipo D, que está caracterizada por una circulación con una densidad elevada, aunque aún conserva cierto grado de estabilidad. El nivel de confort y conveniencia de los conductores es bajo y está causado por el aumento que experimenta el volumen y la tasa de flujo vehicular.

- El flujo es inestable, dejando a los conductores sin libertad de maniobrar.
- Velocidad de operación de hasta 60 km/h.
- La demora que experimentan los conductores con respecto al total del tiempo de viaje es menor a 80 por ciento.
- La razón de flujo para las dos direcciones es de 1830 veh/h, aproximadamente.

Figura 8.4. Vialidad con nivel de servicio tipo D



Fuente: Autores.

NIVEL DE SERVICIO E

La Figura 8.5 muestra una vía con ns de tipo E, donde en este caso el funcionamiento de la vía está cerca del límite de su capacidad y la posibilidad de maniobra es extremadamente difícil.

- Flujo inestable, con tramos donde se suscitan congestionamientos de corta duración.
- Velocidad de operación de hasta 40 km/h.
- La demora que experimentan los conductores con respecto al total del tiempo de viaje es mayor a 80 por ciento.

Figura 8.5. Vialidad con nivel de servicio tipo E



Fuente: Autores.

NIVEL DE SERVICIO F

La Figura 8.6 muestra una vía con ns de tipo F; en este caso, el funcionamiento de la vía es crítico, no se puede maniobrar y el movimiento es casi imposible.

- Flujo forzado.
- Condiciones de maniobrabilidad muy reducido casi nulo.
- Detenciones constantes de los vehículos.
- Congestionamientos vehiculares de larga duración.

Figura 8.6. Vialidad con nivel de servicio tipo F



Fuente: Autores.

La Tabla 8.5 muestra los ns de acuerdo con la pendiente o inclinación del terreno y la velocidad, donde se observa que para la pendiente inferior a 3 % y en el ns de tipo A, las velocidades son superiores a 83 km/h.

Tabla 8.5. Niveles de servicio de acuerdo con la velocidad y en cada tipo de terreno

TIPO DE TERRENO	NIVELES DE SERVICIO					
	Para velocidades en km/h					
	A	B	C	D	E	F
Plano		72-83	62-72	52-62	42-52	
Ondulado		59-68	51-59	43-51	34-43	
Montañoso		45-52	39-45	33-39	26-33	
Escarpado		31-36	27-31	23-27	18-23	

Fuente: Adaptada de *TRB. Highway Capacity Manual*. HCM 2010.

Existe un grupo de condiciones en las autopistas o carreteras que se consideran ideales para el funcionamiento óptimo de las mismas. Para considerar que determinada vialidad opera bajo estas condiciones de perfección, se debe entender que:

- El estado del tiempo es bueno, refiriéndose a temperaturas que estén en un rango aceptable sin causar incomodidad o perjuicio a la conducción y el estado de ánimo del conductor.
- La visibilidad es buena, considerando que no existe ningún impedimento que aminore u obstaculice la observación de los usuarios de la vía, libre de niebla y humo denso.
- La ausencia de accidentes viales en el tramo de interés o en zonas cercanas que provoquen desvíos o compliquen la circulación.
- Ausencia de obras viales.
- Superficie de rodadura de la vía en buen estado.

La medida de efectividad o MOE (por sus siglas en inglés, Measure of Effectiveness) permite definir los niveles de servicio para cada tipo de carretera. Las medidas de efectividad son parámetros capaces de caracterizar las operaciones de tránsito en función de la apreciación del conductor. Se pueden emplear medidas como: velocidad y tiempo de viaje, densidad y demora. Por

factores característicos de las medidas de eficiencia mencionadas es típico que se use en tramos básicos de autopistas, la densidad como principal indicador de eficiencia. En la tabla 8.6, se muestran las medidas de eficiencia para definir los NS en diferentes infraestructuras viales.

Tabla 8.6. MOE para niveles de servicio de diferentes infraestructuras viales

Tipo de infraestructura vial	Medidas de Efectividad (MOE)
Autopistas:	
-Segmentos básicos	Densidad, velocidad, relación volumen a capacidad
-Tramos de entrecruzamiento	Densidad, velocidad
-Rampas de enlace	Densidad, velocidad
Carreteras:	
-Dos carriles	Velocidad, % de tiempo de seguimiento
-Múltiples carriles	Densidad, velocidad, relación volumen a capacidad
Intercepciones:	
-Con semáforos	Demora por controles
-De prioridad	Demora por controles
Arterias urbanas	Velocidad de recorrido
Transporte colectivo	Velocidad de marcha y recorrido, tiempo de espera
Ciclo rutas	Eventos, demoras, velocidad
Peatones	Espacio, eventos, demoras, velocidad

Fuente: Adaptada de Medidas de eficiencia para la definición de los niveles de servicio, *TRB. Highway Capacity Manual 2010*.

Para el caso de los peatones también se pueden determinar los niveles de servicio, aunque sin profundizar en este aspecto. En la tabla 8.7, se muestran los niveles de servicio para peatones en cuanto a su espacio disponible, la tasa de flujo y su velocidad en m/s.

Tabla 8.7. Niveles de Servicio para peatones

Nivel de Servicio	Espacio, m ²	Tasa de flujo (Peatón/mín/m)	Velocidad (m/s)
A			
B			
C			
D			
E			
F		Variable	

Fuente: Adaptada de *TRB. Highway Capacity Manual 2010*.

Nivel de Servicio en carreteras de carriles múltiples

Después de tener claros los aspectos descritos anteriormente, se muestran las características geométricas y las condiciones ideales básicas para la estimación de los niveles de servicio (carreteras de carriles múltiples):

- Carriles con anchura mínima de 3.60 m.
- Distancia libre lateral o Berma total superior a 3.6 m.
- La composición vehicular se considera homogénea y libre de vehículos pesados.
- Sin accesos en el tramo analizado para evitar interrupciones en la corriente.
- Velocidad a flujo libre superior a 96 km/h.
- Vialidad con faja separadora central.

En la tabla 8.8, se muestran los niveles de servicio para carreteras de múltiples carriles con base en las condiciones ideales bases.

Tabla 8.8. ns en carreteras de carriles múltiples con base en condiciones bases ideales

Niveles de Servicio	Velocidades a flujo libre, km/h	Densidad, veh/km/carril
A	Todas	0-7
B	Todas	7-11
C	Todas	11-16
D	Todas	16-22
E	96	22-25
	88	22-26
	80	22-27
	72	22-28
F	96	25
	88	26
	80	27
	72	28

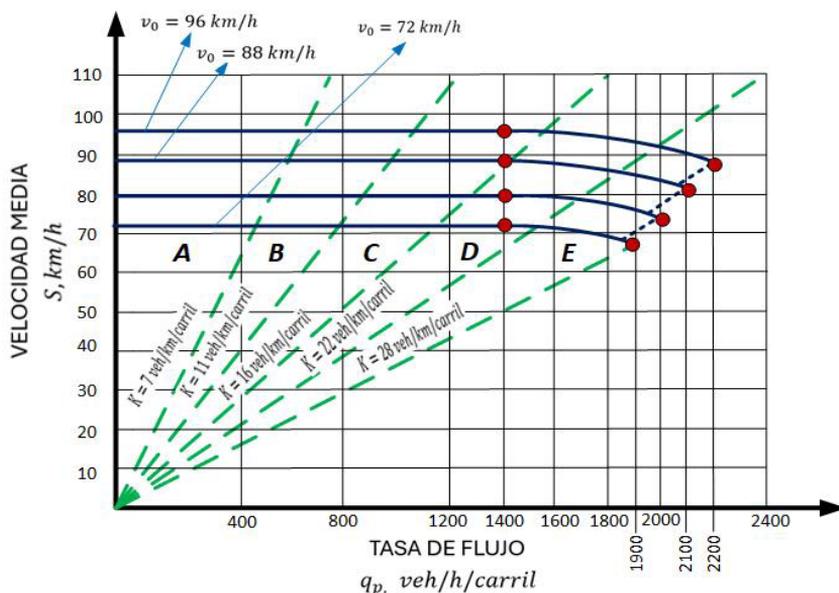
Fuente: Adaptada de TRB. *Highway Capacity Manual*, HCM 2010.

Si se realiza un análisis de la velocidad y la capacidad de los vehículos en la carretera de carriles múltiples con respecto a las autopistas, se puede concluir que ambos parámetros tienden a ser menores en carreteras de carriles múltiples. Esto se debe a que, en carreteras es más notable la presencia de calles transversales, intercepciones y flujos opuestos.

En la Figura 8.7, se muestra la relación entre la tasa de flujo (Q) veh/h/carril y las velocidades medias (V) de automóviles en km/h para diferentes niveles de servicio a partir de la densidad (K). Las curvas resultantes se pueden dividir en dos segmentos fundamentales, el primero y común para todas, en el que la tasa de flujo va de 0 a 1,400 veh/h/carril, donde la velocidad media se mantiene constante, siendo la velocidad de flujo libre.

El segundo segmento aparece cuando la curva deja de ser constante y comienza a decrecer con respecto a la velocidad, este punto que divide ambos segmentos es conocido como punto de quiebre. A partir del punto de quiebre, el decrecimiento es parabólico en la medida que se hace mayor la tasa de flujo, provocando una obligada disminución de la velocidad de los vehículos. Se trazan rectas que parten del origen y con pendiente positiva, donde su valor disminuye con el aumento de la densidad. La curva termina, para cada caso, en el valor de tasa de flujo coincidente con la capacidad básica ideal de la carretera.

Figura 8.7. Niveles de servicio a partir de la relación tasa de flujo-velocidad en carretera de carriles múltiples



Fuente: Adaptada de "Curvas velocidad-flujo y niveles de servicio en carreteras de carriles múltiples", en Cal *et al* (2018), p. 429.

Para la elaboración de la gráfica anterior, se emplearon datos ideales para carreteras de carriles múltiples y los datos aparecen en la tabla 8.9.

Tabla 8.9. Datos para elaboración de gráfica velocidad-tasa de flujo para carreteras de carriles múltiples

Velocidad a flujo libre, km/h	Capacidad ideal, veh/h/carril	Función velocidad-tasa de flujo para segundo segmento
96	2,200	$96 - 0.001259(V_p - 1400)^{1.31}$
88	2,100	$88 - 0.001259(V_p - 1400)^{1.31}$
80	2,000	$80 - 0.001259(V_p - 1400)^{1.31}$
72	1,900	$72 - 0.001259(V_p - 1400)^{1.31}$

Fuente: Adaptada de TRB. *Highway Capacity Manual*. HCM 2010.

ANÁLISIS OPERACIONAL

Para este análisis nos basamos en la metodología del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2010), el cual especifica el procedimiento para obtener los n_s para carreteras de carriles múltiples. Para el desarrollo de la metodología de determinación del nivel de servicio, se requiere:

1. La geometría de la vía.
2. Demanda de los volúmenes de tránsito.
3. Velocidades a flujo libre. Esta velocidad puede ser obtenida en campo o calculada a partir de varios factores de ajuste con una velocidad de flujo base.
4. Ajuste al Volumen de Demanda. Esto se logra a partir de parámetros como: Factor Horario de Máxima Demanda (F_{HMD}); número de carriles; factor de ajuste por vehículos pesados; tipo de conductor.
5. Se evalúa la relación demanda capacidad:

En caso de que se obtenga Demanda > Capacidad; se puede atribuir un n_s de tipo F.

En caso de que se tenga que la Demanda < Capacidad; se continúa al paso siguiente.

6. Estimación de la velocidad y la densidad.
7. Finalmente se determina el n_s con el uso de la gráfica de la Figura 8.7, correspondiente a la relación tasa de flujo-velocidad.

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL n_s

Estimación de la velocidad a flujo libre (v_0)

La estimación de la velocidad a flujo libre se realiza para flujos moderadamente bajos con un valor menor a 1,400 veh_{equiv}/h/carril. Para el caso de carreteras de múltiples carriles, la estimación de la v_0 se realiza con la expresión siguiente:

$$v_0 = B_{v_0} - f_{LW} - f_{LC} - f_M - f_A$$

B_{v_0} - velocidad a flujo libre base

f_{LW} - ajuste por ancho de carril

f_{LC} - ajuste por distancia libre lateral total

f_M - ajuste por tipo de faja separadora central

f_A - ajuste por punto de acceso

Los factores de ajuste para la estimación del nivel de servicio de carreteras y autopistas que se tratan en este documento se amparan en los cuadros del HCM 2010. Los factores que afectan la velocidad de circulación en condiciones de flujo libre base en carreteras de carriles múltiples se explica a continuación.

Ajuste por ancho de carril (f_{LW})

El promedio del ancho de todos los carriles debe ser igual o superior a 3.60 m; en caso contrario, ya se experimenta afectación en cuanto a la velocidad de circulación de los vehículos. Con valores inferiores al señalado, habrá que realizarse un ajuste a la velocidad de flujo libre base tomando como referencia el ancho de carriles. También para tener un valor más aceptado, debe usarse en la determinación de la velocidad de flujo libre el efecto de la regularidad superficial del pavimento, mediante el empleo del factor de reducción.

Ajuste por distancia libre lateral total (f_{LC})

La distancia libre lateral total (TLC), se obtiene mediante la suma de la distancia libre lateral desde el borde derecho de la calzada hasta la obstrucción (LC_R), y la distancia libre lateral, desde el borde izquierdo de la calzada hasta la obstrucción (LC_L).

En carreteras que no presentan separador, no se toma en cuenta la distancia libre lateral en el borde izquierdo, por lo que se toma de valor 1.80 m.

Ajuste por tipo de faja separadora central (f_M)

Este ajuste está asociado con la corriente de aire que genera el flujo de vehículos que circulan en sentido opuesto y su influencia es notable para el caso donde no existe faja separadora central. Pudiendo ser la alcanzar una reducción de velocidad de 2.56 km/h.

Ajuste por punto de acceso (f_A)

Para este caso, se debe calcular la densidad de punto de acceso, la cual se determina como el cociente entre el número total de puntos de acceso en el lado derecho de la dirección principal y la longitud del tramo de la vía en cuestión.

SELECCIÓN DE LA VELOCIDAD A FLUJO LIBRE

Cuando se tiene el valor de la velocidad a flujo libre se señala la curva correspondiente en la gráfica de velocidad-flujo (Figura 8.7). No se permite la interpolación entre las curvas de velocidad, para seleccionar la curva correcta debe emplearse el siguiente criterio:

AJUSTE AL VOLUMEN DE DEMANDA

El volumen horario debe ser ajustado a vehículo liviano/hora/carril para convertirlo en tasa de flujo equivalente, se logra mediante la ecuación siguiente:

$$v_{equiv} = \frac{Q}{FHMD \cdot N \cdot f_{HV} \cdot f_p}$$

donde:

Q - volumen horario por sentido (veh. mixtos/h/sentido)

N - número de carriles por sentido

f_{HV} - factor de ajuste por presencia de vehículos pesados

f_p - factor de ajuste por tipo de conductor

$FHMD$ - factor horario de máxima demanda; en la mayoría de los casos para carreteras de carriles múltiples, se ubica entre 0.75 y 0.95. Por regla general, valores bajos son asociados a una baja densidad vehicular, mientras que valores cercanos a 0.95, se obtienen para zonas urbanas y suburbana en horas de máxima demanda.

FACTOR DE AJUSTE POR VEHÍCULO

El factor de ajuste por vehículo pesado se determina de la forma siguiente:

$$f_{HV,ATS} = \frac{100}{100 + P_T(E_T - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

donde:

P_T - porcentajes de camiones en la corriente vehicular

E_T - automóviles equivalentes a un camión

P_B - porcentajes de autobuses en la corriente vehicular

E_B - automóviles equivalentes a un autobús

P_R - porcentaje de vehículos recreativos en la corriente vehicular

E_R - automóviles equivalentes a un vehículo recreativo

Factor de ajuste por tipo de conductor (f_p): Este presenta valores que oscilan entre 0.85 y 1, dependiente de la condición de la población de conductores que circulan por el tramo de la vía. A los conductores familiarizados y que frecuentemente transitan por esa vía, se les conoce como viajeros comunes y el valor será de este factor de ajuste será de 1. En la medida que tengamos evidencia de lo contrario o para el caso de fines de semana o zonas recreativas, se pueden usar valores menores.

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD Y LA DENSIDAD

Al utilizar la Tabla 8.9, se puede obtener la velocidad media esperada en condiciones base, o se puede obtener una solución gráfica mediante la gráfica de relación velocidad-tasa de flujo (Figura 8.7).

La densidad (K) para carreteras de carriles múltiples, se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$K = \frac{q_{equiv.}}{S}$$

donde:

$q_{equiv.}$ - tasa de flujo de demanda equivalente ($veh_{equiv}/h/carril$)

Es importante destacar que esta expresión de cálculo de la densidad solo es aplicable si la relación volumen-capacidad es menor o igual a 1. Dado que para relaciones volumen-capacidad mayores a la unidad, estaríamos en un ns de tipo F .

DETERMINACIÓN DEL ns

Finalmente, con el valor de la densidad solo se necesita la Tabla 8.8 para determinar con precisión el nivel de servicio.

Nivel de Servicio en segmentos básicos de autopistas

Las características geométricas ideales bases para la estimación de los niveles de servicio en segmentos básicos de autopistas son las siguientes:

- Carriles con anchura mínima de 3.60 m.
- Distancia lateral o Berma mayor a 1.80.
- Faja separadora central de 0.60 m.
- La no presencia de vehículos pesados en la corriente vehicular.
- 5 % o más carriles por sentido para autopistas en zonas urbanas.
- Considera un terreno plano donde la pendiente no supere el 2 por ciento.
- También se consideran los usuarios como conductores frecuentes.

En la Tabla 8.10, se muestra una relación entre los niveles de servicio y la densidad en veh/km/carril para tramos básicos de autopistas, según datos obtenidos del HCM 2010.

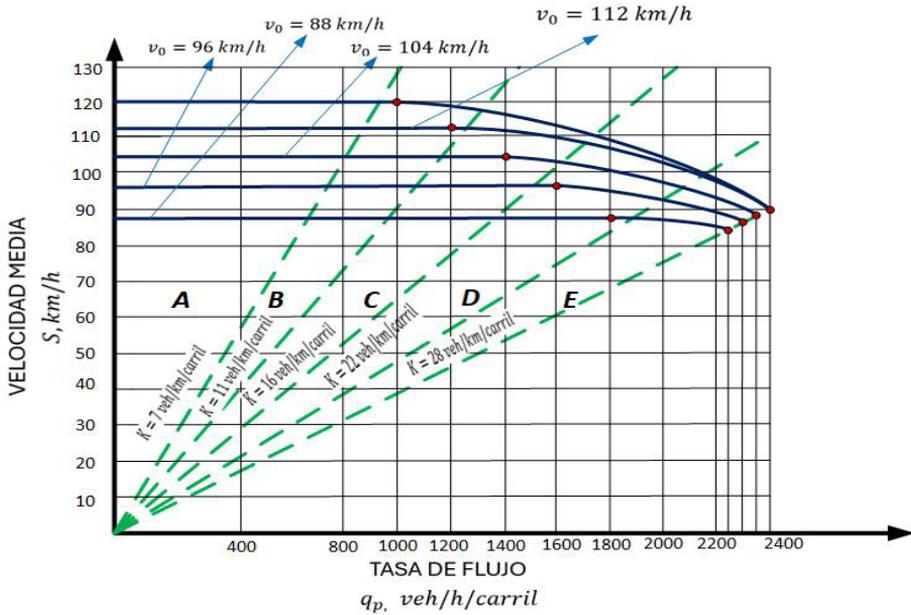
Tabla 8.10. Relación entre NS y Densidad para tramos básicos de autopista

Niveles de Servicio (NS)	Densidad, veh/km/carril
A	≤ 7
B	$< 7-11$
C	$< 11-16$
D	$< 16-22$
E	$< 22-28$
F	≥ 28

Nota. Fuente: Adaptada de TRB. *Highway Capacity Manual*. HCM 2010.

Partiendo de las características bases ideales se determina la gráfica mostrada en la Figura 8.8, donde se aprecia la relación tasa de flujo y velocidades medias de los vehículos circulantes para los distintos niveles de servicio (NS). En dicha gráfica se observa que hasta el punto de quiebre, la velocidad se mantiene constante y dicho punto se alcanza para una tasa de flujo de valores que varían en función de la velocidad de flujo libre.

Figura 8.8. Niveles de servicio a partir de la relación tasa de flujo-velocidad en tramos básicos de autopista



Fuente: Adaptada de TRB. *Highway Capacity Manual*. HCM 2010.

La gráfica anterior (Figura 8.8), se elaboró con los datos de la Tabla 8.11, donde se relacionan la velocidad a flujo libre, la capacidad ideal y la función velocidad-tasa de flujo.

Tabla 8.11. Datos para elaboración de gráfica velocidad-tasa de flujo para tramos básicos de autopista

Velocidad a flujo libre, km/h	Punto de quiebre Veh/h/carril	Capacidad ideal, veh/h/carril	Función velocidad-tasa de flujo para segundo segmento
120	1,000	2,400	$120 - 0.00001771(V_p - 1000)^2$
112	1,200	2,400	$112 - 0.00001856(V_p - 1200)^2$
104	1,400	2,350	$104 - 0.00002269(V_p - 1400)^2$
96	1,600	2,300	$96 - 0.00002906(V_p - 1600)^2$
88	1,800	2,250	$88 - 0.00003950(V_p - 1800)^2$

Fuente: Adaptada de TRB. *Highway Capacity Manual*. HCM 2010.

ANÁLISIS OPERACIONAL

Para este análisis nos basamos en la metodología del HCM 2010, el cual especifica el procedimiento para obtener los niveles de servicio de los tramos básicos de autopista. Pasos para el desarrollo de la metodología de determinación del nivel de servicio:

1. La geometría de la vía.
2. Demanda de los volúmenes de tránsito.
3. Velocidades a flujo libre. Esta velocidad puede ser obtenida en campo o calculada a partir de varios factores de ajuste con una velocidad de flujo base.
4. Ajuste al volumen de demanda. Esto se logra a partir de parámetros como: Factor Horario de Máxima Demanda (FHMD); número de carriles; factor de ajuste por vehículos pesados; tipo de conductor.
5. Se evalúa la relación demanda capacidad:
 En caso de que se obtenga Demanda > Capacidad; se puede atribuir un nivel de tipo F.
 En caso de que se tenga que la Demanda < Capacidad; se continúa al paso siguiente.
6. Estimación de la velocidad y la densidad.

7. Finalmente, se determina el N_S con el uso de la Tabla 8.10, o empleando la gráfica correspondiente tasa de flujo-velocidad.

METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE SERVICIO EN TRAMOS BÁSICOS DE AUTOPISTAS

Determinación de la velocidad a flujo libre (v_0)

La velocidad a flujo libre para el caso de tramos básicos de autopistas se debe realizar cuando las condiciones de la vía presentan flujos relativamente bajos, es decir, que no superen los 1000 veh_{equiv}/h/carril.

En el caso de no disponer de un valor de velocidad a flujo libre medida directamente en campo, es preciso su estimación mediante la fórmula siguiente:

$$v_0 = 120.64 - f_{LW} - f_{LC} - 7.65(f_{ID})^{0.84}$$

donde:

el número 120.64 está en km/h y se refiere a la velocidad de flujo libre base

B_{v_0} ;

f_{LW} - ajuste por ancho de carril.

Según la Publicación Técnica No. 62, del Instituto Mexicano del Transporte perteneciente a la actual SICT, plantea que se puede realizar una modificación al factor de ajuste por ancho de carril (f_{LW}). Esta modificación propone el cambio por otro factor de ajuste para la reducción de la velocidad considerando la regularidad superficial del pavimento el cual se muestra en la Tabla 8.12.

f_{LC} - ajuste por distancia libre lateral a la derecha

f_{ID} - ajuste por densidad de intercambiadores

En la Tabla 8.12, se muestran los diferentes valores de velocidad obtenidos a partir de mediciones en campo, mediante pruebas experimentales en segmentos de autopistas mexicanas. Se combinan la velocidad, el ancho de carril y el Índice de Rugosidad Internacional (IRI).

Tabla 8.12. Factor de reducción de velocidad por IRI y ancho de carril

IRI	Reducción a la velocidad por IRI y ancho de carril, km/h		
	Ancho de carril		
	3.30	3.55	3.65
2.5	10.25	5.71	0.00
3	13.53	8.67	2.70
4	20.18	14.71	8.13
5	26.94	20.91	13.82
6	33.83	27.28	19.77
7	40.83	33.80	25.98
8	47.95	40.48	32.45
9	55.19	47.33	39.18
10	62.55	54.33	46.17
11	70.03	61.50	53.42
12	77.63	68.83	60.93

Fuente: Adaptada de SCT. Instituto Mexicano del Transporte. Efecto de la regularidad superficial en la capacidad vial de autopistas y carreteras multicarril mexicanas. Publicación Técnica No. 62. México, 2004.

Selección de la curva de velocidad a flujo libre correspondiente en tramos básicos de autopistas

No es recomendable la interpolación entre curvas, por lo que el criterio de selección se muestra en la Figura 8.9.

Figura 8.9. Criterio de selección de la curva adecuada para tramos básicos de autopista

$116 \text{ km/h} \leq v_0 < 124 \text{ km/h}$	utilizar $v_0 = 120 \text{ km/h}$
$108 \text{ km/h} \leq v_0 < 116 \text{ km/h}$	utilizar $v_0 = 112 \text{ km/h}$
$100 \text{ km/h} \leq v_0 < 108 \text{ km/h}$	utilizar $v_0 = 104 \text{ km/h}$
$92 \text{ km/h} \leq v_0 < 100 \text{ km/h}$	utilizar $v_0 = 96 \text{ km/h}$
$84 \text{ km/h} \leq v_0 < 92 \text{ km/h}$	utilizar $v_0 = 88 \text{ km/h}$

Fuente: Adaptada de TRB. *Highway Capacity Manual*. HCM 2010.

Ajuste al volumen de demanda

La tasa de flujo horario debe ser representativa de la variación temporal del flujo dentro de la hora estudiada, la influencia negativa de los vehículos pesados y el tipo de conductor. Llegando a una tasa de flujo vehicular equivalente mediante la ecuación:

$$q_{equiv} = \frac{Q_{60}}{FHMD \cdot N \cdot f_{HV} \cdot f_{equiv}}$$

donde:

q_{equiv} - tasa de flujo equivalente

Q - volumen horario por sentido condiciones prevalecientes (veh_{mixtos}/h/carril)

$FHMD$ - factor horario de máxima demanda

N - número de carriles por sentido

f_{HV} - factor ajuste por vehículos pesados

f_p - factor de ajuste tipo de conductor

El factor de ajuste por vehículo pesado se determina de la forma siguiente:

$$f_{HV,ATS} = \frac{100}{100 + P_T(E_T - 1) + P_B(E_B - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

donde:

P_T - porcentajes de camiones en la corriente vehicular

E_T - automóviles equivalentes a un camión

P_B - porcentajes de autobuses en la corriente vehicular

E_B - automóviles equivalentes a un autobús

P_R - porcentaje de vehículos recreativos en la corriente vehicular

E_R - automóviles equivalentes a un vehículo recreativo

Estimación de la velocidad y la densidad

Con el empleo de la Tabla 8.11, se puede calcular la velocidad media. Directamente con el uso de la curva velocidad-tasa de flujo, se puede obtener una solución gráfica.

Finalmente, la densidad se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{q_{equiv}}{V}$$

K - densidad

q_{equiv} - tasa de flujo equivalente

V - velocidad media de los automóviles en condiciones base

Con la densidad calculada y empleando la Tabla 8.10 ("Relación entre N_S y densidad para tramos básicos de autopista"), se determina el nivel de servicio que corresponde. Cabe destacar que, el uso de esta ecuación solo es válido si la relación volumen-capacidad es igual o menor a la unidad.

Nivel de servicio en carreteras de dos carriles

Este tipo de vialidad se caracteriza por una calzada que posee solamente un carril de circulación en cada sentido. Esta vialidad permite los rebases en algunos tramos de esta y solo es posible el adelantamiento al utilizar el carril en sentido contrario, por lo que se deben de tomar muchas medidas para efectuar la

maniobra. Estas maniobras se realizan cuando las condiciones físicas y geométricas lo facilitan, con una visibilidad adecuada. Tomando en cuenta que los adelantamientos son sobre el carril donde transitan los vehículos en sentido opuesto, la capacidad y los ns dependen en gran parte del volumen de tránsito que circula en dicho carril. Es importante destacar que los niveles de servicio para las carreteras de dos carriles se analizan para ambos sentidos de circulación.

Las carreteras de dos carriles se clasifican en:

Clase I. Es fácil para los conductores alcanzar una velocidad de flujo libre. Por lo general son interurbanas, arterias primarias que sirven de vías de conexión con grandes distribuidores de tráfico, redes primarias de carreteras nacionales.

Clase II. No es posible alcanzar la máxima velocidad para los conductores, pero sí pueden viajar a cómodas velocidades de circulación. Por lo general son usadas como conexión con carreteras de Clase I, no son arterias principales y en su mayoría están construidas en terrenos escarpados. Son usadas para viajes medianamente cortos.

Clase III. Estas vialidades se encuentran en áreas con cierto nivel de desarrollo. Pueden encontrarse como tramos o segmentos dentro de las carreteras de Clase I y II con acceso a zonas recreativas o de esparcimiento y en algunos casos pasan por poblados de baja densidad. Estas vías contienen segmentos donde está muy limitada la velocidad, ya que el volumen de tránsito es un poco mayor que en zonas rurales.

Las condiciones que se consideran como ideales o básicas en este tipo de carreteras son las que se mencionan a continuación:

- Ancho de carril superior a 3.60 m.
- Acotamiento de anchura igual o mayor de 1.8 m.
- En toda la vía se puede rebasar vehículos.
- No existencia de vehículos pesados en la corriente vehicular.
- No existencia de restricciones del tránsito directo o de paso.
- Terreno nivelado con pendiente casi nula.

- Una capacidad de 1,700 veh_{equi}/h por sentido y de 3,200 veh_{equi}/h en ambos sentidos.
- Se considera un flujo opuesto máximo de 1,500 veh_{equi}/h.

ANÁLISIS OPERACIONAL

Para este análisis nos basamos en la metodología del HCM 2010, la cual especifica el procedimiento para obtener los ν_s para carreteras de carriles múltiples. Pasos para el desarrollo de la metodología de determinación del nivel de servicio:

1. La geometría de la vía.
2. Demanda de los volúmenes de tránsito.
3. Velocidades a flujo libre base o velocidad media en campo. Esta velocidad puede ser obtenida en campo o calculada a partir de varios factores de ajuste.
4. Ajuste a la Demanda para la estimación de la velocidad media de viaje. Esto se logra a partir de parámetros como: Factor Horario de Máxima Demanda (FHMD); factor de ajuste por vehículos pesados y Factor de ajuste por pendiente. (Solo para Clase I o Clase III).
5. Estimación de la velocidad media de viaje. (Solo para Clase I o Clase III).
6. Ajuste a la Demanda para la estimación del porcentaje de tiempo empleado en seguimiento. (Solo para Clase I o Clase II).
7. Estimación del porcentaje de tiempo empleado en seguimiento. (Solo para Clase I o Clase II).
8. Estimación del porcentaje de la velocidad a flujo libre. (Solo para Clase III).
9. Finalmente se determina el ν_s y la capacidad con el uso de la gráfica correspondiente tasa de flujo-velocidad.

Desarrollo de la metodología

ESTIMAR LA VELOCIDAD A FLUJO LIBRE (v_0)

La v_0 se define como medida de velocidad media, obtenida en condiciones de un volumen de tránsito menor a 200 veh_{equiv}/h en ambos sentidos de circulación para el caso de carreteras de dos carriles.

Se puede obtener la v_0 mediante estimación usando ecuaciones de cálculo o con medición directa en campo.

La medición directa en campo debe hacerse en condiciones de bajo flujo de tránsito y se deben de tomar muestras aleatorias de al menos 100 vehículos en cada sentido. En los casos donde la medición se realice con una tasa de flujo superior a 200 veh/h/carril, será necesario e imprescindible realizar una corrección con el empleo de la expresión siguiente:

$$v_0 = S_{FM} + 0.0124 \left(\frac{q}{f_{HV,ATS}} \right)$$

donde:

S_{FM} - velocidad media del tránsito medida en campo para tasa de flujo superior a 200 veh/h/carril, km/h

q - tasa de flujo observado, durante el periodo cuando fueron obtenidos los datos de campo, veh/h/ambos sentidos

f_{HV} - factor de ajuste por presencia de vehículos pesados, en el cálculo de la velocidad media de viaje

Cuando desde un comienzo, se desea realizar una estimación de la v_0 , sin datos de campo, se necesita introducir el término velocidad a flujo libre base (B_{v_0}). La B_{v_0} nos permite caracterizar las condiciones de operación de determinada carretera en función de la velocidad, y se puede obtener a partir de conocer la velocidad de proyecto. En muchos estudios se propone también emplear la velocidad límite y a esta sumarle 16 km/h para estimar el valor de la B_{v_0} , aplicando la expresión siguiente:

$$v_0 = B_{v_0} - f_{LS} - f_A$$

donde:

B_{v_0} - velocidad a flujo libre base, km/h

f_{LS} - ajuste por anchos de carril y acotamiento

f_A - ajuste por densidad de puntos de acceso. La densidad de puntos de acceso se obtiene al dividir el número total de intercepciones de prioridad en ambos lados de la carretera para el tramo en estudio

Ajuste al volumen para la estimación de la velocidad media de viaje (ATS)

Este paso solo es aplicable a las carreteras de Clase I y III. El primer paso radica en la determinación de la tasa de flujo de demanda (q_i) para estimar la velocidad media de flujo.

$$q_{i,ATS} = \frac{Q_i}{FHMD \cdot f_{g,ATS} \cdot f_{HV,ATS}}$$

donde:

$q_{i,ATS}$ - tasa de flujo de demanda, (veh_{equiv}/h/sentido)

Q_i - volumen de demanda en el sentido i

$FHMD$ - factor horario de máxima demanda

$f_{HV,ATS}$ - factor de ajuste por presencia de vehículo pesados

$f_{g,ATS}$ - factor de ajuste por tipo de terreno y pendiente. Este factor tiene en cuenta el efecto que provoca el tipo de terreno y la existencia de pendientes en la velocidad de los vehículos (TRB, HCM 2010)

El factor de ajuste por presencia de vehículos pesados f_{HV} es determinado a partir de la fórmula siguiente:

$$f_{HV,ATS} = \frac{100}{100 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

donde:

P_T - porcentajes de camiones en la corriente vehicular

E_T - automóviles equivalentes a un camión

P_R - porcentaje de vehículos recreativos

E_R - automóviles equivalentes a un vehículo recreativo

Estimación de la velocidad media de viaje (ATS)

La velocidad media de viaje solo se estima para carreteras de Clase I y III, y se determina con el uso de la expresión siguiente:

$$ATS_1 = v_0 - 0.0124(q_{1,ATS} + q_{2,ATS}) - f_{np,ATS}$$

donde:

ATS_1 - velocidad media de viaje en la dirección de interés, km/h

v_0 - velocidad de flujo libre, km/h

q_1 - tasa de flujo de demanda equivalente en la dirección analizada (veh/h/sentido)

q_2 - tasa de flujo de demanda equivalente en dirección contraria (veh/h/sentido)

f_{np} - ajuste por porcentaje de zonas de no rebase en la dirección 1

Ajuste al volumen para la estimación del porcentaje de tiempo empleado en el seguimiento (PTSF)

Solo se estima para carreteras de Clase I y II, y se determina con el uso de la expresión siguiente:

$$q_{i,PTSF} = \frac{Q_i}{FHMD \cdot f_{g,PTSF} \cdot f_{HV,PTSF}}$$

donde:

$q_{i,PTSF}$ - tasa de flujo de demanda, (veh_{equiv}/h/sentido)

Q_i - volumen de demanda en el sentido i

$FHMD$ - factor horario de máxima demanda

$f_{HV,PTSF}$ - factor de ajuste por presencia de vehículo pesados

$f_{g,PTSF}$ - factor de ajuste por tipo de terreno y pendiente. Este puede encontrarse en los cuadros del HCM 2010

La determinación del factor de ajuste por vehículo pesado se determina mediante la expresión siguiente:

$$f_{HV,PTSF} = \frac{100}{100 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)}$$

donde:

P_T - porcentajes de camiones en la corriente vehicular

E_T - automóviles equivalentes a un vehículo pesado

P_R - porcentaje de vehículos recreativos

E_R - automóviles equivalentes a un vehículo recreativo

Estimación del porcentaje de tiempo empleado en seguimiento (PTSF)

Solo se estima para carreteras de Clase I y II, y se determina con el uso de la expresión siguiente:

$$PTSF_1 = BPTSF_1 + f_{n,PTSF} \left(\frac{q_{1,PTSF}}{q_{1,PTSF} + q_{2,PTSF}} \right)$$

donde:

$PTSF_1$ - porcentaje de tiempo empleado en seguimiento en la dirección analizada (%)

$BPTSF_1$ - porcentaje base de tiempo empleado en seguimiento en la dirección analizada (%)

$f_{np,PTSF}$ - ajuste por porcentaje de zonas de no rebase en el tramo analizado (%)

$q_{1,PTSF}$ - tasa de flujo de demanda equivalente en la dirección estudiada

$q_{2,PTSF}$ - tasa de flujo de demanda equivalente en la dirección contraria

El $BPTSF_1$, se determina a partir de la expresión siguiente:

$$BPTSF_1 = 100(1 - e^{aq_{1,PTSF}^b})$$

donde:

a y b - son coeficientes que se obtienen usando el valor de la tasa de flujo en la dirección 2 (opuesta)

Estimación del porcentaje de la velocidad a flujo libre (Pv_0)

Solo se estima para carreteras de Clase III, y se determina con el uso de la expresión siguiente:

$$Pv_0 = \frac{ATS_1}{VFL}$$

Determinación del ns y la capacidad

Después de aplicado el procedimiento metodológico y de tener el valor de cada una de las medidas de efectividad necesarias, se procede a la comparación con la Tabla 8.13 de niveles de servicio para carreteras de dos carriles según (TRB, HCM 2010). Solo en el caso de las carreteras de Clase I, donde se tienen dos medidas de servicio, se tomará el ns más desfavorable.

Tabla 8.13. Niveles de servicio para carreteras de dos carriles de circulación

Nivel de Servicio	Clase I		Clase II	Clase III
	Velocidad media de viaje	% de tiempo consumido en seguimiento	% de tiempo consumido en seguimiento	% de tiempo consumido en seguimiento
A	>88	≤35	≤40	>91.7
B	>88-88	>35-50	>40-55	>83.3-91.7
C	>72-80	>50-65	>55-70	>75.0-83.3
D	>64-72	>65-80	>70-85	>66.7-75.0
E	≤64	>80	>85	≤66.7

Fuente: Adaptada de TRB. *Highway Capacity Manual*. HCM 2010.

