

1 Teoría de Flujo Vehicular

El tránsito vehicular (también llamado tráfico vehicular, o simplemente tráfico) es el fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Antes de cualquier diseño geométrico de una vía se deben conocer las características del tránsito que va a ocupar esa carretera o calle.

Figura 1.1-1 Flujo vehicular



Fuente: Elaboración propia.

1.1 Generalidades

Mediante el análisis de los elementos de flujo vehicular se pueden entender las características y el comportamiento del tránsito, requisitos básicos para el planteamiento, proyecto y operación de carreteras, calles y sus obras complementarias dentro del sistema de transporte. Con la aplicación de las leyes de la física y las matemáticas, el análisis del flujo vehicular describe la forma como circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad, lo cual permite determinar el Nivel de eficiencia de la operación.

Uno de los resultados más útiles del análisis del flujo vehicular es el desarrollo de los modelos microscópicos y macroscópicos que relacionan sus diferentes variables como el volumen, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento. Estos modelos han sido la base del desarrollo del concepto de Capacidad y Niveles de Servicio aplicado a diferentes tipos de elementos viales.

El objetivo, al abordar el análisis del flujo vehicular, es dar a conocer algunas de las metodologías e investigaciones y sus aplicaciones más relevantes en este tema, con particular énfasis en los aspectos que relacionan las variables del flujo vehicular, la descripción probabilística o casual del flujo de tránsito, la distribución de los vehículos en una vialidad y las distribuciones estadísticas empleadas en proyecto y control de tránsito.

1.2 Características del flujo vehicular

Solo se tratará en este capítulo la descripción de las características básicas del flujo vehicular para las condiciones de operación en flujo continuo, dado que las condiciones correspondientes al flujo interrumpido no son consideradas en esta tesis.

1.2.1 Conceptos fundamentales

En esta sección se presenta una descripción de algunas de las características fundamentales del flujo vehicular, representadas en sus tres variables principales: el *flujo*, la *velocidad* y la *densidad*. Mediante la deducción de relaciones entre ellas, se puede determinar las características de la corriente de tránsito, y así predecir las consecuencias de diferentes opciones de operación o de proyecto. De igual manera, el conocimiento de estas tres variables reviste singular importancia, ya que éstas indican la calidad o Nivel de Servicio experimentado por los usuarios de cualquier sistema vial. A su vez, estas tres variables pueden ser expresadas en términos de otras, llamadas variables asociadas. El *volumen*, el *intervalo*, el *espaciamiento*, la *distancia* y el *tiempo*.

Las tres características principales que se pueden explicar matemáticamente son:

- ⇒ La velocidad
- ⇒ El volumen o intensidad de tránsito.
- ⇒ La densidad

Estas tres características principales de la teoría de flujo vehicular se describen a continuación.

1.2.2 Velocidad

La velocidad es definida como una razón de movimiento en distancia por unidad de tiempo, generalmente como kilómetros por hora (km/h). El HCM 2000 usa la velocidad promedio de viaje como la medida de velocidad, ya que es fácil de calcular observando cada vehículo dentro del tránsito y es la medida estadística más relevante en relación con otras variables.

1.2.2.1 Velocidad promedio de viaje

La velocidad promedio de viaje es una medida de tránsito basada en la observación del tiempo de viaje en una longitud dada de carretera. Se calcula como la longitud del segmento dividido entre el tiempo promedio de viaje de los vehículos que pasan por dicho segmento, incluyendo todos los tiempos de demoras por paradas.

La velocidad promedio de viaje se calcula dividiendo el largo de la carretera, sección o segmento bajo consideración entre el tiempo promedio de viaje de los vehículos que pasan por dicho segmento. La Ecuación 1.2-1 expresa la velocidad promedio de viaje.

Ecuación 1.2-1

$$S = \frac{L}{t_a}$$

Dónde:

- S = Velocidad promedio de viaje (km/h),
- L = Longitud del segmento de carretera (km), y
- t_a = Tiempo promedio de viaje en el segmento (h).

1.2.2.2 Velocidad a flujo libre

La velocidad de flujo libre (FFS por sus siglas en inglés, free flow speed) es la velocidad promedio de los vehículos en una carretera dada, medida bajo condiciones de un volumen bajo, cuando los conductores tienden a conducir a una velocidad alta sin restricciones de demoras.

1.2.3 Volumen o intensidad de tránsito

El volumen de tránsito es definido como el número de vehículos que pasan en un determinado punto durante un intervalo de tiempo. La unidad para el volumen es simplemente “vehículos” o “vehículos por unidad de tiempo”.

Un intervalo común de tiempo para el volumen es un día, descrito como vehículos por día. Los volúmenes diarios frecuentemente son usados como base para la planificación de las carreteras.



Para los análisis operacionales, se usan los volúmenes horarios, ya que el volumen varía considerablemente durante el curso de las 24 horas del día. La hora del día que tiene el volumen horario más alto es llamada “hora pico” (HP), u hora de máxima demanda (HMD).

1.2.4 Factor de Hora Pico

El factor de la hora pico (FHP) representa la variación en la circulación dentro de una hora. Las observaciones de la circulación indican constantemente que los volúmenes encontrados en el periodo de 15 minutos del pico dentro de una hora no se encuentran sostenidos a través de la hora completa. El uso del factor de la hora pico en la ecuación para determinar la tasa de flujo considera este fenómeno.

En vías multicarriles, los valores típicos del factor de hora pico, FHP varían entre 0.80 y 0.95. Un factor de hora pico bajo es característico de condiciones rurales.

Factores altos son condiciones típicas de entornos urbanos y suburbanos en condiciones de hora pico. Los datos del campo deben ser utilizados en lo posible para desarrollar el cálculo del factor de hora pico de condiciones locales.

El factor de hora pico es la relación entre el volumen horario de máxima demanda (VHMD) y el flujo máximo ($q_{\text{máx}}$), que se presenta en un periodo dado dentro de dicha hora como se aprecia en la Ecuación 1.2-2:

Ecuación 1.2-2

$$FHP = \frac{VHMD}{q_{\text{máx}} * N}$$

El factor de la hora de pico es un indicador de las características del flujo de tránsito en periodos máximos. Si este valor es igual a 1 significa uniformidad, en cambio valores muy pequeños indicarán concentraciones de flujos máximos.

1.2.5 Densidad

La densidad es el número de vehículos que ocupa cierta longitud dada de una carretera o carril y generalmente se expresa como vehículos por kilómetro (veh/km).

La densidad se puede calcular como se expresa en la Ecuación 1.2-3:

Ecuación 1.2-3

$$D = \frac{v}{S}$$

Dónde

- v = Razón de flujo (veh p/h),
- S = Velocidad promedio de viaje (km/h), y
- D = Densidad (veh p/km/carril).



La densidad es posiblemente el parámetro más importante en el tránsito, porque es la medida más directamente relacionada con la demanda de tránsito.

A continuación se verán los principales conceptos relacionados con las variables del flujo vehicular.

1.2.6 Variables relacionadas con el flujo

Las variables relacionadas con el flujo son la *tasa de flujo*, el *volumen*, el *intervalo simple* entre vehículos consecutivos y el *intervalo promedio* entre vehículos.

1) Tasa de flujo o flujo (q) y volumen (Q)

La *tasa de flujo*, q , es la frecuencia a la cual pasan los vehículos por un punto o sección transversal de un carril o calzada. La tasa de flujo es pues, el número de vehículos, N , que pasan durante un intervalo de tiempo específico, T , inferior a una hora, expresada en vehículos por minuto (veh/min) o vehículos por segundo (veh/s). No obstante, la tasa de flujo q , también puede ser expresada en vehículos por hora (veh/h), teniendo cuidado de su interpretación, pues no se trata del número de vehículos que efectivamente pasan durante una hora completa o *volumen* horario, Q . La tasa de flujo, q , se calcula entonces con la Ecuación 1.2-4:

Ecuación 1.2-4

$$q = \frac{N}{T}$$

2) Intervalo simple (h_i)

Es el intervalo de tiempo entre el paso de dos vehículos consecutivos, generalmente expresado en segundos y medido entre puntos homólogos del par de vehículos.

3) Intervalo promedio (\bar{h})

Es el promedio de todos los intervalos simples, h_i , existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en segundos por vehículo (s/veh) y se calcula, de acuerdo a la Figura 1.2-1, mediante la Ecuación 1.2-5:

Ecuación 1.2-5

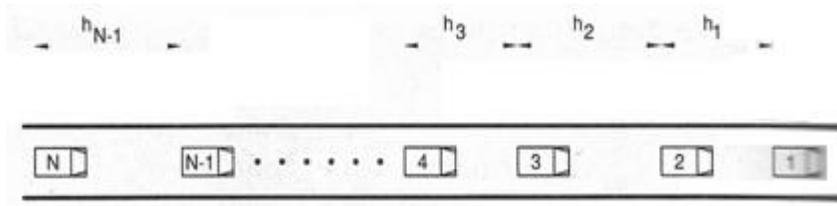
$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} h_i}{N - 1}$$

Dónde:

- \bar{h} = Intervalo promedio (s/veh),
- N = Número de vehículos (veh),
- $N - 1$ = Número de intervalos (veh), y
- h_i = Intervalo simple entre el vehículo i y el vehículo $i + 1$



Figura 1.2-1 Intervalos entre vehículos



Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).

Obsérvese que las unidades del *intervalo promedio* \bar{h} (s/veh) son las unidades inversas de la tasa de flujo q (veh/s), por lo que también puede plantearse la Ecuación 1.2-6:

Ecuación 1.2-6

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

1.2.7 Variables relacionadas con la velocidad

Las variables del flujo vehicular relacionadas con la velocidad son la *velocidad de punto*, la *velocidad instantánea*, la *velocidad media temporal*, la *velocidad media espacial*, la *velocidad de recorrido*, la *velocidad de marcha*, la *distancia de recorrido* y el *tiempo de recorrido*.

1.2.8 Variables relacionadas con la densidad

Las variables del flujo vehicular relacionadas con la densidad son la *densidad* o *concentración*, el *espaciamiento simple* entre vehículos consecutivos y el *espaciamiento promedio* entre varios vehículos.

1) Densidad o concentración (k)

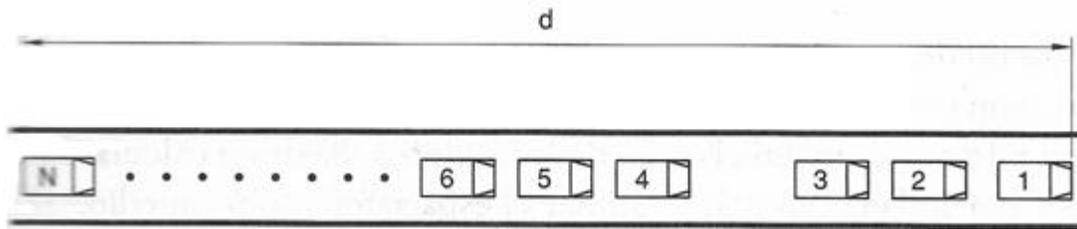
Es el número, N , de vehículos que ocupan una longitud específica, d , en una vialidad en un momento dado. Generalmente se expresa en vehículos por kilómetro (veh/km), ya sea referido a un carril o a todos los carriles de una calzada. Según la Figura 1.2-2 se calcula con la Ecuación 1.2-7:

Ecuación 1.2-7

$$k = \frac{N}{d}$$



Figura 1.2-2 Densidad o concentración



Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).
 2) *Espaciamiento simple (s_i)*

Es la distancia entre el paso de dos vehículos consecutivos, usualmente expresada en metros y medida entre sus defensas traseras.

3) *Espaciamiento promedio (\bar{s})*

Es el promedio de todos los espaciamentos simples, s_i , existentes entre los diversos vehículos que circulan por una vialidad. Por tratarse de un promedio se expresa en metros por vehículo (m/veh) y se calcula, de acuerdo a la

Figura 1.2-3 mediante la Ecuación 1.2-8:

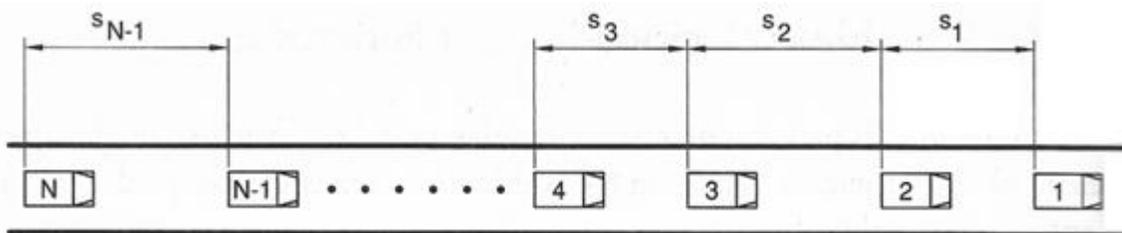
Ecuación 1.2-8

$$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} s_i}{N - 1}$$

Dónde:

- \bar{s} = Espaciamiento promedio (m/veh),
- N = Número de vehículos (veh),
- $N - 1$ = Número de espaciamentos (veh), y
- s_i = Espaciamiento simple entre el vehículo i y el vehículo $i + 1$.

Figura 1.2-3 Espaciamentos entre vehículos



Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).

Obsérvese que las unidades del *espaciamiento promedio* \bar{s} (m/veh) son las unidades inversas de la *densidad* k (veh/m), por lo que también puede plantearse la Ecuación 1.2-9:

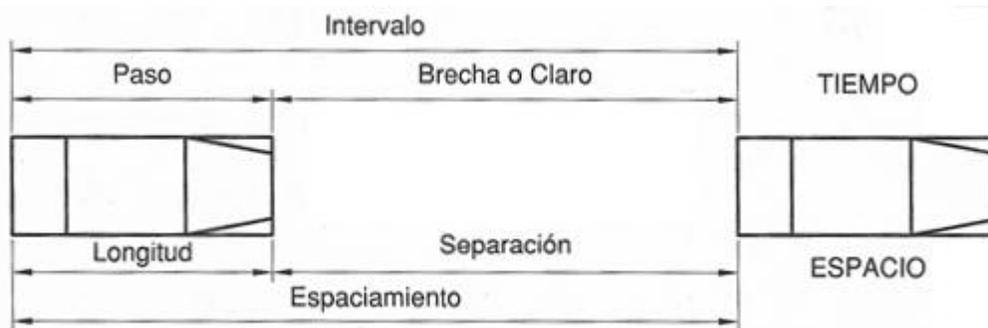
Ecuación 1.2-9

$$\bar{s} = \frac{1}{k}$$

1.2.9 Relación entre el flujo, la velocidad, la densidad, el intervalo y el espaciamiento

El esquema de la Figura 1.2-4 muestra un par de vehículos consecutivos a los cuales se les han asociado atributos tanto en el *tiempo* como en el *espacio*. Así, por ejemplo, el *paso* es el tiempo necesario para que el vehículo recorra su propia *longitud*, y la *brecha* o *claro* es el intervalo de tiempo libre disponible entre los dos vehículos, equivalente a la *separación* entre ellos medida desde la defensa trasera del primer vehículo hasta la defensa delantera del segundo vehículo, dividida por la *velocidad* (la del segundo vehículo o la del grupo de vehículos si todos ellos viajan a la misma velocidad).

Figura 1.2-4 Relaciones de tiempo y espacio entre vehículos



Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).

Con base en la Figura 1.2-4 y considerando un grupo vehicular que se mueve a *velocidad* (\bar{v}_e) aproximadamente constante, su *intervalo promedio* (\bar{h}) y *espaciamiento promedio* (\bar{s}) se pueden relacionar así en la Ecuación 1.2-10:

$$\text{Espaciamiento} = (\text{Velocidad})(\text{Tiempo})$$

Ecuación 1.2-10

$$\bar{s} = \bar{v}_e \bar{h}$$

Como se puede ver en la expresión anterior, para un grupo de vehículos, el intervalo promedio y el espaciamiento promedio se relacionan a través de la velocidad media espacial.

También, como cualquier otro fluido continuo, el flujo de la corriente de tránsito puede definirse en términos de sus tres variables principales: la *tasa de flujo* q , la *velocidad* v y la *densidad* k .



Por la Ecuación 1.2-6 y la Ecuación 1.2-9, se sabe que:

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

$$\bar{s} = \frac{1}{k}$$

Reemplazando los dos valores anteriores en la Ecuación 1.2-10, queda:

$$\frac{1}{k} = \bar{v}_e \left(\frac{1}{q} \right)$$

De donde:

Ecuación 1.2-11

$$q = \bar{v}_e k$$

A la anterior correlación se le conoce como la *ecuación fundamental del flujo vehicular*, que en *forma general* se expresa como:

Ecuación 1.2-12

$$q = vk$$

Los resultados numéricos dados por la ecuación fundamental del flujo vehicular dependen del método de medición empleado para definir cada una de sus variables y de la forma de promediarlas, ya que, como es conocido, existen mediciones de tipo puntual, mediciones sobre distancias o tramos específicos y mediciones dentro de todo un sistema.

1.3 Modelos básicos de flujo vehicular

Los anteriores conceptos y relaciones fundamentales, constituyen el punto de partida para analizar aún más las características del flujo vehicular a través de sus *tres variables principales*: *flujo (q)*, *velocidad (v)* y *densidad (k)*, relacionadas mediante la *ecuación fundamental del flujo vehicular*, que como se demostró, su forma general es:

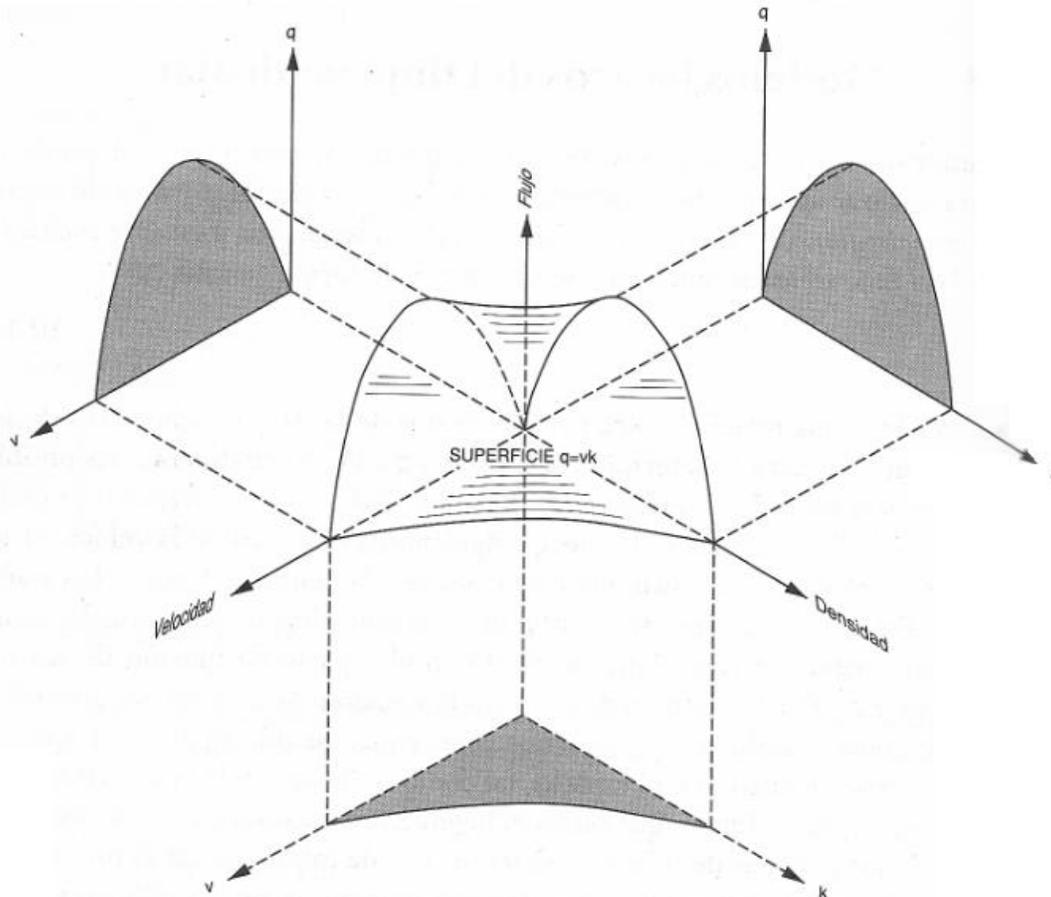
$$q = vk$$

Si se establece una relación entre cualquiera dos de las tres variables, la relación de estas dos con la tercera la determina la ecuación $q=vk$. Naturalmente, las posibles combinaciones son *velocidad-densidad (v, k)*, *flujo-densidad (q, k)* y *velocidad-flujo (v, q)*. La variable más fácil de medir es el flujo q , siguiéndole en su orden la velocidad v y la densidad k . por esta razón, usualmente se considera la densidad k como la variable dependiente. De todas maneras no existe una variable dependiente aislada, como tampoco existe cuando se representa un punto en el espacio en función de sus tres coordenadas (x, y, z) . Por lo tanto, es de gran ayuda visualizar la *ecuación fundamental del flujo*



vehicular, considerando la superficie que representa, cuando se grafica sobre ejes mutuamente perpendiculares en el espacio, tal como se ilustra en la Figura 1.3-1.

Figura 1.3-1 Relación fundamental del flujo vehicular



Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).

Uno de los objetivos finales que busca el ingeniero de tránsito es el de optimizar la operación de los sistemas de tránsito existentes y el de intervenir en el proyecto de sistemas viales futuros bastante eficientes. De esta manera, la *optimización* en tránsito indica la selección de las mejores condiciones de operación, sujeto a las habilidades del sistema o recursos y a las restricciones del usuario y del medio ambiente.

Las *medidas de efectividad*, que entran en el *objetivo* definido como una *función*, inherentes en el criterio de optimización, serán aquellas que se puedan expresar como una función de las variables de tránsito presentes en el problema, llamadas *variables de decisión*. La tarea es, desde luego, elegir valores para las variables de decisión o control que hagan óptima la función objetivo.

En los modelos *determinísticos*, los cuales otorgan un valor preciso para cada medida de efectividad definida al tomar ciertos valores específicos las variables de decisión, aplicados a problemas de tránsito, se supone que las relaciones funcionales entre las variables de entrada y

los parámetros que miden la efectividad son constantes. Esto es, solo ocurrirá un *valor* de la función objetivo para cualquier *conjunto dado de valores* de las variables de entrada.

En general los modelos del flujo vehicular se pueden clasificar en dos grandes clases: microscópicos y macroscópicos. Los *modelos microscópicos* consideran los espaciamientos y las velocidades individuales de los vehículos, con base en la teoría del seguimiento vehicular. Los *modelos macroscópicos* describen la operación vehicular en términos de sus variables de flujo, generalmente tomadas como promedios. A su vez, estos modelos del flujo vehicular son la base de la simulación microscópica y macroscópica.

Los esfuerzos en tratar de relacionar las diferentes parejas de las tres variables principales de flujo vehicular (q, v, k) se han basado en toma de datos y ajuste simple a curvas o regresión, en métodos deductivos a partir de condiciones límite o de frontera y en analogías físicas. Estas tres formas de aproximarse al fenómeno del tránsito, han dado como resultado el desarrollo de modelos macroscópicos, los cuales suponen un movimiento homogéneo o condiciones de *flujo estacionario* y describen las características generales o globales de la corriente vehicular. A continuación se analiza únicamente el **modelo lineal**, ya que es la parte que concierne a la tesis desarrollada.

1.3.1 Modelo lineal

B.D. Greenshields llevó a cabo una de las primeras investigaciones sobre el comportamiento del flujo vehicular, en la cual estudio la relación existente entre la velocidad y la densidad. Utilizando el conjunto de datos (k, v), para diferentes condiciones del tránsito, propuso una relación lineal entre la *velocidad* v y la *densidad* k , que mediante el ajuste por el método de mínimos cuadrados, según la Figura 1.3-2, se llega al *modelo lineal* siguiente:

Ecuación 1.3-1

$$\bar{v}_e = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c}\right) k$$

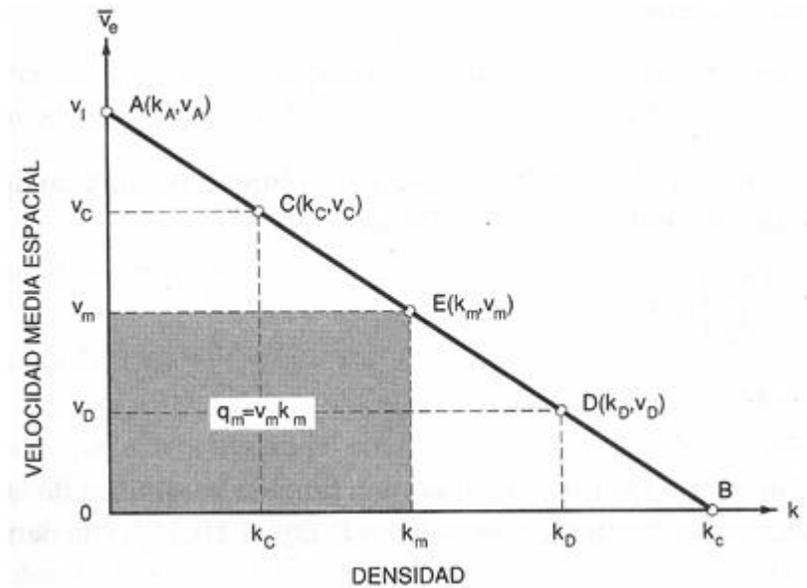
Dónde:

- \bar{v}_e = Velocidad media espacial (km/h),
- k = Densidad (veh/km/carril),
- v_l = Velocidad media espacial a flujo libre (km/h), y
- k_c = Densidad de congestión (veh/km/carril).

En general la velocidad disminuye a medida que aumenta la densidad, desde un valor máximo o velocidad a flujo libre v_l (punto A), hasta un valor mínimo $\bar{v}_e=0$ (punto B) donde la densidad alcanza su máximo valor o de congestión k_c .



Figura 1.3-2 Relación lineal entre la velocidad y la densidad



Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).

Obviamente, en la práctica, la densidad nunca toma el valor de cero, lo cual quiere decir que para que exista velocidad a flujo libre, debe presentarse al menos un vehículo sobre la calle o carretera circulando a esa velocidad. Bajo esta condición, la densidad es muy baja, tal que el vehículo o los pocos vehículos circulan libremente a la velocidad máxima o límite establecido por la vialidad. En el otro extremo, al presentarse congestión, los vehículos están detenidos uno tras de otro.

El flujo, q , se puede representar en el diagrama velocidad-densidad, a través de la ecuación fundamental $q=vk$, donde para cualquier punto sobre la recta de coordenadas (k, v) , el producto vk es el área de un rectángulo cuyo lado horizontal es la densidad k y cuyo lado vertical es la velocidad v . Así, por ejemplo, para los puntos C y D, los flujos asociados a las densidades y velocidades correspondientes son:

$$q_C = v_C k_C$$

$$q_D = v_D k_D$$

El rectángulo de área máxima corresponde al punto E, que está ubicado exactamente en la mitad de la recta. Su área, sombreada en la Figura 1.3-2, representa el *flujo máximo*, q_m , el cual se obtiene para los valores siguientes de v_m y k_m :

Ecuación 1.3-2

$$v_m = \frac{v_l}{2}$$



Ecuación 1.3-3

$$k_m = \frac{k_c}{2}$$

Por lo tanto, el flujo máximo es:

Ecuación 1.3-4

$$q_m = v_m k_m$$

O lo que es lo mismo:

Ecuación 1.3-5

$$q_m = \frac{v_l k_c}{4}$$

La relación entre el *flujo* q y la *densidad* k , se obtiene reemplazando la Ecuación 1.3-1 en la Ecuación 1.2-12 fundamental, así:

$$q = vk = \left[v_l - \left(\frac{v_l}{k_c} \right) k \right] k$$

Ecuación 1.3-6

$$q = v_l k - \left(\frac{v_l}{k_c} \right) k^2$$

Esta ecuación expresa al flujo q como una función parabólica de la densidad k . por lo tanto, la forma de la curva, mostrada en la Figura 1.3-3, es la de una parábola.

Por definición se requiere que cuando la densidad se aproxime a cero, el flujo también se aproxime a cero, lo cual representa condiciones de operación a flujo libre (punto A). Igualmente, cuando la densidad es la máxima, $k=k_c$, los vehículos se detienen uno tras otro, defensa delantera a defensa trasera, tal que no avanzan, $q=0$ (punto B).

Entre los dos extremos anteriores, existe una diversidad de condiciones de flujo vehicular, identificadas por los puntos C , D y E , reflejando éste último características de operación a flujo máximo o Capacidad, $q=q_m$.

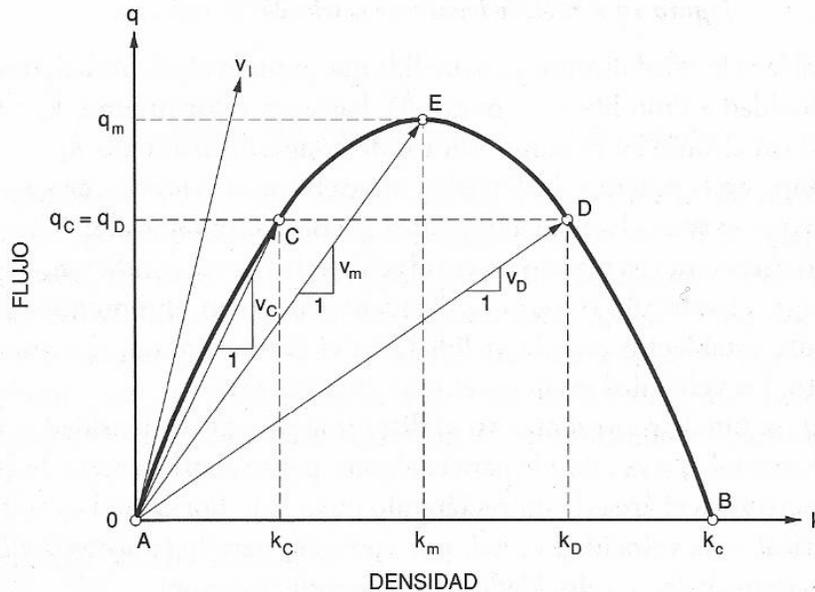
La velocidad, v , se puede también representar en el diagrama flujo-densidad, despejándola de la ecuación fundamental $q=vk$:

Ecuación 1.3-7

$$v = \frac{q}{k}$$



Figura 1.3-3 Relación parabólica entre el flujo y la densidad



Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).

La expresión anterior es la pendiente del vector dirigido desde el origen A a cualquier punto sobre la curva. Así, para los puntos C, D y E, se tiene:

$$\text{Pendiente de AC} = v_c = \frac{q_c}{k_c}$$

$$\text{Pendiente de AD} = v_D = \frac{q_D}{k_D}$$

$$\text{Pendiente de AE} = v_m = \frac{q_m}{k_m}$$

Obsérvese que a la densidad del congestionamiento, $k=k_c$ (punto B), la pendiente del vector AB es cero, indicando que no existe velocidad pues los vehículos están completamente detenidos o en congestionamiento total. En la medida en que el flujo q y la densidad k se aproximan a cero, el vector tiende a ser tangente a la curva y su pendiente representa la velocidad a flujo libre v_l . El valor de la velocidad a flujo libre depende del conductor, de las características de su vehículo, de las características geométricas de la vialidad, ancho de carriles, pendientes, distancias de visibilidad, etc. y de otros factores tales como la iluminación y el estado del tiempo.

La relación entre la velocidad y el flujo q , se obtiene despejando la densidad k de la Ecuación 1.3-1 y reemplazando su valor en la Ecuación 1.2-11, de la siguiente manera:

De la ecuación:

$$k = k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right) \bar{v}_e$$

Reemplazando en la Ecuación 1.2-11:

$$\begin{aligned} q &= \bar{v}_e k = \bar{v}_e \left[k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right) \bar{v}_e \right] \\ &= \bar{v}_e k_c - \left(\frac{k_c}{v_l}\right) (\bar{v}_e)^2 \end{aligned}$$

De donde:

Ecuación 1.3-8

$$\bar{v}_e = \frac{v_l}{2} \pm \frac{\sqrt{v_l^2 - 4\left(\frac{v_l}{k_c}\right)q}}{2}$$

Esta última expresión, representada en la Figura 1.3-4, indica que entre la velocidad y el flujo existe una relación parabólica, donde para un valor determinado del flujo ($q=q_c=q_D$), hay asociados dos valores de la velocidad (v_c y v_D). En la medida que el flujo q aumenta, desde el punto A a velocidad a flujo libre, la velocidad v progresivamente disminuye. De manera que si para una determinada vialidad, el flujo de entrada q (demanda) se aproxima a la Capacidad q_m (máxima oferta o Servicio), la dinámica del flujo vehicular puede causar que éste se reduzca por debajo de la Capacidad, con velocidades correspondientes a la porción inferior de la curva desde el punto E hasta el punto B, indicando que la operación ocurre a Nivel de congestión.

La densidad, k , se puede también representar en el diagrama velocidad-flujo, despejándola de la ecuación fundamental $q=vk$:

$$k = \frac{q}{v} = \frac{1}{\frac{v}{q}}$$

En la expresión anterior, la pendiente del vector dirigido desde el origen B a cualquier punto sobre la curva, es el inverso de la densidad en ese punto. Así, para los puntos C, D y E, se tiene:

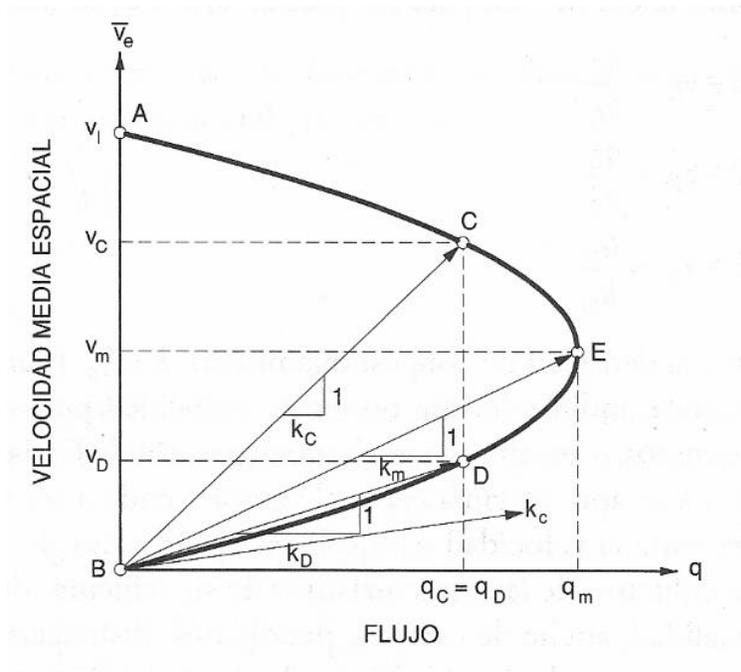
$$\text{Pendiente de BC} = \frac{1}{k_c} = \frac{v_c}{q_c}$$

$$\text{Pendiente de BD} = \frac{1}{k_D} = \frac{v_D}{q_D}$$

$$\text{Pendiente de BE} = \frac{1}{k_m} = \frac{v_m}{q_m}$$



Figura 1.3-4 Relación parabólica entre la velocidad y el flujo

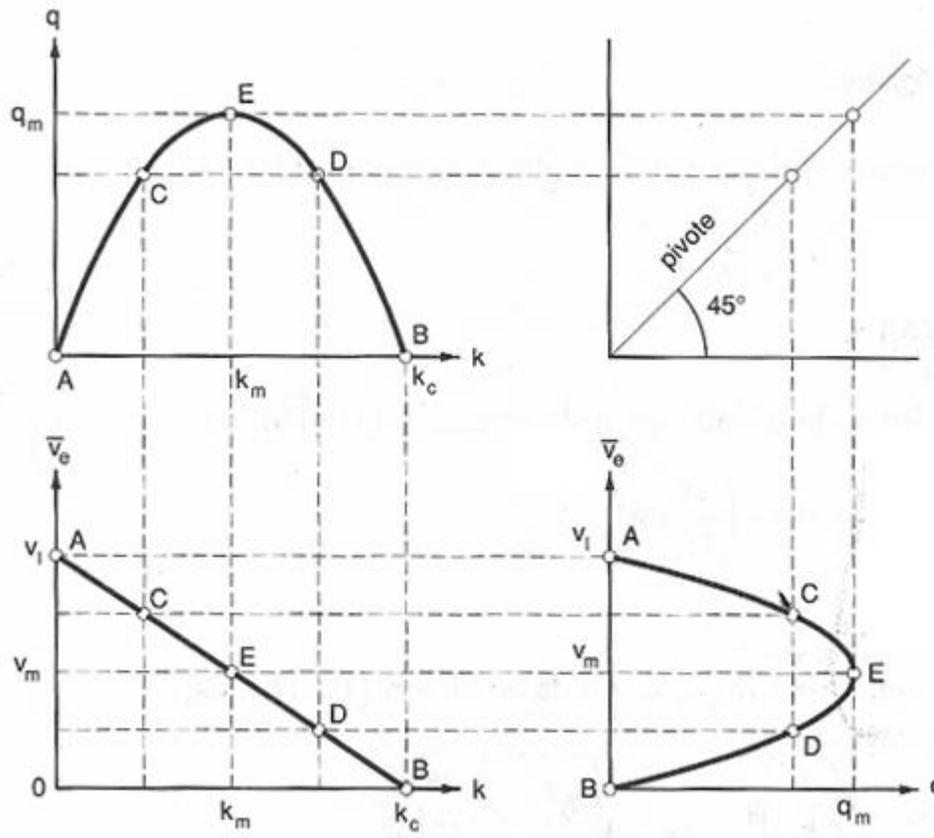


Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).

Obsérvese que en los Niveles de congestión total, $q=0$ (punto B), la pendiente del vector en el punto B es casi cero, indicando que los vehículos están completamente detenidos, alcanzándose la densidad máxima o de congestión k_c . Por el contrario, a la velocidad a flujo libre, $v=v_l$ (punto A), la pendiente del vector BA tiende a infinito, indicando que la densidad tiende a cero, es decir, hay pocos vehículos circulando a flujo libre.

En la Figura 1.3-5 aparecen dibujadas las tres relaciones básicas en un solo diagrama fundamental, el cual permite ver la interrelación entre cada una de ellas. En la práctica cada una de ellas tiene su uso particular. Así, por ejemplo, la relación *velocidad-densidad* es el punto de partida de la mayoría de los modelos o enfoques teóricos del flujo vehicular, puesto que para un simple valor de la densidad existe un solo valor de la velocidad; esta situación no ocurre en los otros casos. La relación *flujo-densidad* es la base para el control de tránsito en autopistas, puesto que la densidad o concentración se puede expresar en términos del porcentaje de ocupación de tramos específicos en un momento dado. La relación *velocidad-flujo* es utilizada principalmente para identificar los Niveles de Servicio (velocidades) y los Niveles de productividad (flujos).

Figura 1.3-5 Diagrama fundamental del flujo vehicular



Fuente: Ingeniería de Tránsito, Fundamentos y aplicaciones (Reyes Espíndola, y otros, 2007).

Finalmente, se puede observar que las regiones correspondientes a *flujos de tránsito no congestionados* están limitadas por:

$$0 \leq q \leq q_m$$

$$v_m \leq \bar{v}_e \leq v_l$$

$$0 \leq k \leq k_m$$

1.4 Tipos de flujo de tráfico

El Manual de Capacidad de Carreteras clasifica a los distintos tipos de caminos en dos categorías o tipos de operación del flujo vehicular:

- ⇒ Continuo y
- ⇒ Discontinuo

Los términos "flujo Continuo" y "flujo discontinuo" solo describen el tipo de camino y no la calidad del flujo de tránsito que en un determinado momento circula por el mismo. Así por ejemplo, una



autopista que, en un momento dado, experimenta un alto grado de congestión, sigue siendo un camino de flujo continuo pues las causas que originan esa congestión son internas de la corriente de tránsito.

Las autopistas y sus componentes operan bajo las más puras condiciones de flujo continuo ya que no solo en ellas no existen interrupciones fijas al tránsito, sino que además los accesos y egresos son controlados y limitados a las ubicaciones de las ramas de entrada y salida.

Los caminos multicarril y los de dos carriles también pueden operar bajo las condiciones de flujo continuo en tramos largos ubicados entre puntos en los cuales existen elementos de control que producen la interrupción de la corriente vehicular.

En el análisis de los caminos con flujo discontinuo debe tomarse en cuenta en el impacto de las interrupciones fijas. Así por ejemplo, un semáforo limita el tiempo disponible para los distintos movimientos del tránsito de la intersección en la cual están emplazados. En consecuencia la Capacidad queda limitada no solo por el espacio físico proporcionado por la intersección, sino también por el tiempo disponible para los distintos movimientos de la corriente de tránsito.

A continuación se presentan las definiciones para ambos tipos de flujo.

1.4.1 Flujo Continuo

Es aquel en que el vehículo que va transitando por la vía solo se ve obligado a detenerse por razones inherentes al tráfico. Es el tráfico de las carreteras. Los vehículos se detienen cuando ocurre un accidente, cuando llegan a un destino específico, paradas intermedias, etc.

Los caminos que poseen las características de flujo continuo no tienen elementos externos a la corriente del tránsito, tales como semáforos, que puedan interrumpir el mismo. Cuando se tiene un camino que opera en estas condiciones, las características de operación de los vehículos que por él circulan son el resultado de la intersección entre los vehículos existentes en la corriente de tránsito y entre los vehículos y las características geométricas y del medio ambiente en el cual se desarrolla el camino.

En otras palabras, el flujo continuo es la circulación de vehículos donde no existen intersecciones con semáforos o con señales de alto.

1.4.2 Flujo Discontinuo o Ininterrumpido

Es el característico de las calles, donde las interrupciones son frecuentes por cualquier motivo, siendo una de estas los controles de tránsito de las intersecciones como son los semáforos, los ceda el paso, etc.

Los caminos que poseen las características de flujo interrumpido poseen elementos fijos que pueden interrumpir la corriente vehicular. En esos elementos se incluyen los semáforos, las señales de alto y cualquier otro dispositivo de control del tránsito, cuya presencia origina la detención periódica de los vehículos (o la disminución significativa de su velocidad) independientemente de los volúmenes de tránsito existentes.



El flujo interrumpido es la circulación de vehículos en las carreteras donde existen intersecciones como semáforos o señales de alto y es utilizado para el tránsito urbano.

1.5 Diferencias entre los dos tipos de corriente:

Entre las principales diferencias entre los dos tipos de corriente se pueden señalar:

- ⇒ Procedimientos más complejos, debido a la dimensión de tiempo que participa en la asignación de espacio para el tráfico en corrientes conflictivas.
- ⇒ Medidas operacionales definidas como:
 - Volumen y /o tasa de flujo
 - Parámetros variables de paradas o señales de control.
 - Espacios disponibles en la corriente de tráfico conflictiva
 - Retardo en promedio de segundos por vehículo.

1.6 Tipo de vehículo

Las condiciones del flujo vehicular que influyen a la Capacidad y a los Niveles de Servicio involucran al tipo de vehículo y a la distribución de los vehículos entre carriles y por sentido. Los procedimientos de cálculo presuponen que los conductores están familiarizados con la vía por la cual circulan. La menor eficiencia en el uso de los caminos que se observa en los días de fin de semana o en las zonas de recreación, es atribuida principalmente a la falta de conocimientos específicos de las particularidades de los caminos, por parte de los usuarios no habituales.

La presencia de vehículos pesados, - esto es, vehículos distintos a los automóviles (que comprenden no solo a los automóviles, sino también a las pick-ups, las furgonetas, las vans) – en la corriente de tránsito afecta al número de vehículos que pueden ser servidos por la vía.

Los vehículos pesados afectan, en forma adversa, a la corriente vehicular de dos maneras:

- ⇒ Los vehículos pesados son más largos que los automóviles y por lo tanto ocupan un mayor espacio de calzada o de carril que estos últimos.
- ⇒ Los vehículos pesados como consecuencia de su baja relación potencia – peso, presentan pobres condiciones de operación, comparadas con la de los automóviles, particularmente en lo que al poder de aceleración y desaceleración se refiere, como así también a las posibilidades de mantener la velocidad en pendientes positivas.

La última de las características de los vehículos pesados mencionadas, resulta ser la más crítica, pues debido a que en muchos casos, cuando esos vehículos no pueden alcanzar y mantener la velocidad desarrollada por los automóviles, se forman largos espacios en la corriente vehicular que difícilmente pueden ser cubiertos mediante las maniobras de sobrepaso, produciéndose en consecuencia una deficiente utilización del camino.

Este efecto es fundamentalmente nocivo en pendientes pronunciadas, donde las diferencias en las condiciones de operación entre los automóviles y los vehículos pesados son más notables,



especialmente en aquellos caminos de dos carriles, en los cuales el sobrepaso debe efectuarse utilizando el carril destinado al tránsito que circula en sentido contrario.

Normalmente el tráfico se divide en tres grupos:

- ⇒ Motocicletas
- ⇒ Vehículos ligeros

Los vehículos ligeros son todos aquellos vehículos de pasajeros de uso particular o arrendamiento con máximo cuatro ruedas en contacto con el pavimento.

- ⇒ Vehículos pesados

Los vehículos pesados son todos aquellos que tienen más de cuatro ruedas en contacto con el pavimento.

