

### 3 Capacidad y Nivel de Servicio



En las fases de planeación, estudio, proyecto y operación de autopistas y calles, la *demanda* de tránsito, presente o futura, se considera común una cantidad conocida. Una medida de la *eficiencia* con la que un sistema vial presta Servicio a esta demanda, es su *Capacidad* u *oferta*.

Las estimaciones de Capacidad y Niveles de Servicio son necesarias para la mayoría de las decisiones de la Ingeniería de Tránsito y planeación del transporte.

Un objetivo básico del análisis de Capacidad es la estimación del máximo número de vehículos a los que una vía puede dar Servicio con seguridad razonable dentro de un periodo de tiempo. El análisis de Capacidad proporciona una forma de estimar la máxima cantidad de flujo vehicular a la que se puede dar Servicio en una vía. El análisis de Capacidad es un conjunto de procedimientos de estimación de las posibilidades de la vía, para transportar el flujo en condiciones de operación definidas.



### 3.1 Capacidad

Teóricamente la **Capacidad** se define como la tasa máxima de flujo que puede soportar una autopista o calle. De manera particular, la Capacidad de una infraestructura vial es el máximo número de vehículos que razonablemente pueden pasar por un punto o sección uniforme de un carril o calzada durante un intervalo de tiempo dado, bajo las condiciones prevalecientes de la infraestructura vial, del tránsito y de los dispositivos de control.<sup>2</sup>

El intervalo de tiempo utilizado en la mayoría de los análisis de Capacidad es de 15 minutos, debido a que se considera que éste es el intervalo más corto durante el cual puede presentarse un flujo estable. Como se sabe, que el volumen en 15 minutos así obtenido es convertido a tasa de flujo horaria, entonces la Capacidad de un sistema vial, es la *tasa máxima horaria*.

La infraestructura vial, como ya se explicó en el capítulo anterior sea ésta una autopista o calle, puede ser de circulación continua o discontinua. Los sistemas viales de *circulación continua* no tienen elementos externos al flujo de tránsito, tales como los semáforos y señales de alto que produzcan interrupciones en el mismo. Los sistemas viales de *circulación discontinua* tienen elementos fijos que producen interrupciones periódicas del flujo de tránsito, independientemente de la cantidad de vehículos, tales como los semáforos, las intersecciones de prioridad con señales de alto y ceda el paso, y otros tipos de regulación.

Dependiendo del tipo de infraestructura vial a analizar, se debe establecer un procedimiento para el cálculo de su Capacidad y calidad de operación.

Por lo tanto, el principal objetivo del análisis de Capacidad, es estimar el máximo número de vehículos que un sistema vial puede acomodar con razonable seguridad durante un periodo específico. Sin embargo, los sistemas operan pobremente a Capacidad; pero generalmente ellos raramente se planifican para operar en este rango.

A su vez, mediante los análisis de Capacidad, también se estima la cantidad máxima de vehículos que el sistema vial puede acomodar mientras se mantiene una determinada calidad de operación, introduciéndose aquí el concepto de Nivel de Servicio.

### 3.2 Nivel de Servicio

Para medir la calidad del flujo vehicular se usa el concepto de *Nivel de Servicio*. Es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular, y de su percepción por los motoristas y/o pasajeros. Estas condiciones se describen en términos de factores tales como la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad de realizar maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial.

De los factores que afectan el Nivel de Servicio, se distinguen los internos y los externos. Los internos son aquellos que correspondan a variaciones en la velocidad, en el volumen, en la composición del tránsito, en el porcentaje de movimientos de entrecruzamientos o direccionales,

<sup>2</sup> Manual de Capacidad de Carreteras 2000 (HCM2000)



etc. Entre los externos están las características físicas, tales como la anchura de los carriles, la distancia libre lateral, la anchura de acotamientos, las pendientes, etc.

El Manual de Capacidad Vial HCM 2000 del TRB ha establecido seis Niveles de Servicio denominados: A, B, C, D, E, y F, que van del mejor al peor, los cuales se definen según que las condiciones de operación sean de circulación continua o discontinua, como se verá más adelante.

### 3.2.1 Niveles de Servicio

Las condiciones de operación de los Niveles de Servicio, que se ilustran a continuación, son:

#### Nivel de Servicio A

Representa circulación a flujo libre. Los usuarios, considerados en forma individual, están virtualmente exentos de los efectos de la presencia de otros en la circulación. Poseen una altísima libertad para seleccionar sus velocidades deseadas y maniobrar dentro del tránsito. El Nivel general de comodidad y conveniencia proporcionado por la circulación es excelente.

#### Nivel de Servicio B

Esta aun dentro del rango de flujo libre, aunque se empiezan a observar otros vehículos integrantes de la circulación. La libertad de selección de las velocidades deseadas sigue relativamente inafectada, aunque disminuye un poco la libertad de maniobrar. El Nivel de comodidad y conveniencia comienza a influir en el comportamiento individual de cada uno.

#### Nivel de Servicio C

Pertenece al rango de flujo estable, pero marca el comienzo del dominio en que la operación de los usuarios individuales se ve afectada de forma significativa por las interacciones con los otros usuarios. La selección de velocidad se ve afectada por la presencia de otros, y la libertad de maniobra comienza a ser restringida. El Nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.

#### Nivel de Servicio D

Representa una circulación de densidad elevada, aunque estable. La velocidad y libertad de maniobra quedan seriamente restringidas, y el usuario experimenta un Nivel general de comodidad y conveniencia bajo. Pequeños incrementos en el flujo generalmente ocasionan problemas de funcionamiento, incluso con formación de pequeñas colas.

#### Nivel de Servicio E

El funcionamiento está en él, o cerca del, límite de su Capacidad. La velocidad de todos se ve reducida a un valor bajo, bastante uniforme. La libertad de maniobra para circular es extremadamente difícil, y se consigue forzando a los vehículos a “ceder el paso”. Los Niveles de comodidad y conveniencia son enormemente bajos, siendo muy elevada la frustración de los



conductores. La circulación es normalmente inestable, debido a que los pequeños aumentos del flujo o ligeras perturbaciones del tránsito producen colapsos.

#### Nivel de Servicio F

Representa condiciones de flujo forzado. Esta situación se produce cuando la cantidad de tránsito que se acerca a un punto, excede la cantidad que puede pasar por él. En estos lugares se forman colas, donde la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, extremadamente inestables, típicas de los “cuellos de botella”.

Figura 3.2-1 Nivel de Servicio A

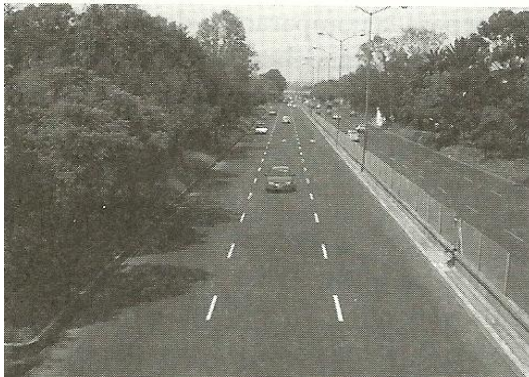


Figura 3.2-2 Nivel de Servicio B



Figura 3.2-3 Nivel de Servicio C



Figura 3.2-4 Nivel de Servicio D



Figura 3.2-5 Nivel de Servicio E



Figura 3.2-6 Nivel de Servicio F



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

### 3.3 Condiciones prevalecientes

Es necesario tener en cuenta el carácter probabilístico de la Capacidad, por lo que puede ser mayor o menor en un instante dado. A su vez, como la definición misma lo expresa, la Capacidad se define para *condiciones prevalecientes*, que son factores que al variar la modifican; estos se agrupan en tres tipos generales:

#### 3.3.1 Condiciones de la infraestructura vial

Son las características físicas de la autopista o calle (de tránsito continuo o discontinuo, con o sin control de accesos, dividida o no, de dos o más carriles, etc.), el desarrollo de su entorno, las características geométricas (ancho de carriles y acotamientos, obstrucciones laterales, velocidad de proyecto, restricciones para el rebase, carriles exclusivos y característicos de los alineamientos), y el tipo de terreno donde se aloja la infraestructura vial.

#### 3.3.2 Condiciones del tránsito

Se refiere a la distribución del tránsito en el tiempo y en el espacio; a su composición en tipo de vehículos como livianos, camiones, autobuses y vehículos recreativos; a la distribución direccional en autopistas de dos carriles de dos sentidos; y a la distribución por carril en autopistas de carriles múltiples.

#### 3.3.3 Condiciones de los controles

Hace referencia a los dispositivos para el control del tránsito, tales como los semáforos (fases, longitudes de ciclo, repartición de verdes, etc.), las señales restrictivas (alto, ceda el paso, no estacionarse, solo vueltas a la izquierda, etc.) y las velocidades límite.

#### 3.3.4 Condiciones base o ideales

Una condición base o ideal, es una condición óptima estándar específica de referencia, que deberá ser ajustada para tener en cuenta las condiciones prevalecientes. Las condiciones base asumen buen estado del tiempo, buenas condiciones del pavimento, usuarios familiarizados con el sistema vial y sin impedimentos en el flujo vehicular. Dependiendo del tipo de sistema vial en estudio, existe una serie de condiciones base, específica para cada uno de ellos. Por lo anterior, se puede plantear de manera general, una condición prevaleciente en función de una condición base, mediante cualquiera de las dos siguientes relaciones:

$$\text{Condición prevaleciente} = \text{Condición Base} - \text{Ajuste}$$

$$\text{Condición prevaleciente} = \text{Condición Base} \times \text{Factor de Ajuste}$$

### 3.4 Criterios de análisis de Capacidad y Niveles de Servicio

#### 3.4.1 Criterios

Los factores *externos* que afectan el Nivel de Servicio, como son *físicos*, pueden ser medidos a una hora conveniente. En cambio los factores *internos*, por ser variables, deben ser medidos durante el periodo de mayor flujo, como por ejemplo el factor de la hora de máxima demanda. El flujo de vehículos en la hora de máxima demanda no está uniformemente distribuido en ese lapso. Para



tomar esto en cuenta, es conveniente determinar la proporción del flujo para un periodo máximo dentro de la hora de máxima demanda. Usualmente se acostumbra un periodo de 15 minutos.

Por lo general, no se realizan estudios de *Capacidad* para determinar la cantidad máxima de vehículos que puede alojar cierta parte de una autopista o calle; lo que se hace es tratar de determinar el *Nivel de Servicio* al que funciona cierto tramo, o bien la tasa de flujo admisible dentro de cierto Nivel de Servicio. En determinadas circunstancias se hace el análisis para predecir con que flujos, o volúmenes, y a qué plazo se llegara a la Capacidad de esa parte del sistema vial.

En función del Nivel de Servicio estará el número de vehículos por unidad de tiempo que puede admitir la autopista o calle, al cual se le denomina *flujo de Servicio*. Este flujo va aumentando a medida que el Nivel de Servicio va siendo de menor calidad, hasta llega al Nivel *E*, o Capacidad del tramo de autopista o calle. Más allá de este Nivel se registraran condiciones más desfavorables, por ejemplo, con Nivel *F*, pero no aumenta el flujo de Servicio, sino que disminuye.

Tradicionalmente se ha considerado la *velocidad* el principal indicador para identificar el Nivel de Servicio. Sin embargo, los métodos modernos introducen, además de la velocidad, otros indicadores, como por ejemplo, la *densidad* para casos de circulación continua y la *demora* para casos de circulación discontinua.

En cualquiera de los casos un indicador primordial para valorar el grado de utilización de la Capacidad de un sistema vial y, por consiguiente, su Nivel de Servicio, es la relación entre el flujo y la Capacidad, ya sea entre el *flujo de demanda* y la *Capacidad*, o bien la relación entre el *flujo de Servicio* y la *Capacidad*, según el problema específico. En situaciones donde se conoce la demanda y la Capacidad y se desea determinar el Nivel de Servicio, el flujo representa el flujo de demanda. En el caso cuando se conoce la Capacidad y se especifica un determinado Nivel de Servicio, el flujo representa el flujo de Servicio posible con dicho Nivel.

El HCM 2000 reporta para *autopistas*, en *condiciones base o ideales*, Capacidades de hasta 2,400 vehículos ligeros/hora/carril. A su vez, dicho Manual para Carreteras rurales y suburbanas de *carriles múltiples*, establece como Capacidad ideal o base para este tipo de autopistas el valor de 2,200 vehículos ligeros/hora/carril.

El análisis que comúnmente se realiza, sirve para determinar el efecto de los factores externos e internos en la Capacidad base o ideal de cierto tramo de autopista o calle, y el flujo de Servicio que corresponde a un Nivel de Servicio dado. Los estudios de Capacidad sirven para aislar y medir esos factores. En general, se ha hecho una clasificación de factores y se han determinado ciertas relaciones que permiten valorarlos.

De no existir estos factores, se han fijado factores comunes numéricos, determinados empíricamente la mayoría de las veces, que pueden usarse para deducir matemáticamente la Capacidad que se tendría.

La determinación de estos factores y los procedimientos de análisis están contenidos en las versiones anteriores del HCM. Se resalta que el *Highway Capacity Manual 2000*, editado por el Transportation Research Board de los Estados Unidos, constituye el más extenso trabajo realizado



hasta la fecha sobre la Capacidad de cualquier componente de un sistema vial rural y urbano, y aunque muchos de los factores pueden corresponder a condiciones específicas de la vialidad en los Estados Unidos, se ha utilizado en otros países con resultados muy positivos, y en donde los procedimientos lo han permitido, se ha incorporado información de estudios locales, adaptando y calibrando el Manual a las condiciones propias de cada país.

La Capacidad de una infraestructura vial es tan variable como pueden serlo las variables físicas del mismo, o las condiciones del tránsito. Por esta razón los análisis de Capacidad se realizan aislando las diversas partes del sistema vial, como un tramo recto, un tramo con curvas, un tramo con pendientes, el acceso a una intersección, un tramo de entrecruzamiento, una rampa de enlace, etc. Se trata pues, de buscar en cada una de estas partes, condiciones uniformes, por lo tanto, segmentos con condiciones prevalecientes diferentes, tendrán Capacidades diferentes.

Para fines de interpretación uniforme y metodológica ordenada, se han establecido los siguientes criterios:

- ⇒ El flujo y la Capacidad, bajo condiciones prevalecientes, se expresan en vehículos mixtos por hora para cada tramo de la autopista o calle.
- ⇒ El Nivel de Servicio se aplica a un tramo significativo de la autopista o calle. Dicho tramo puede variar en sus condiciones de operación, en diferentes puntos, debido a variaciones en el flujo de vehículos o en su Capacidad. Las variaciones en Capacidad provienen de cambios de anchura, por pendientes, por restricciones laterales, por intersecciones, etc. Las variaciones de flujo se originan porque los volúmenes de vehículos que entran y salen del tramo lo realizan en ciertos puntos a lo largo de él y a diferentes horas del día. El Nivel de Servicio del tramo debe tomar en cuenta, por lo tanto, el efecto general de estas limitaciones.
- ⇒ Los elementos usados para medir la Capacidad y los Niveles de Servicio son variables, cuyos valores se obtienen fácilmente de los datos disponibles. Por lo que corresponde a Capacidad, se requieren el tipo de infraestructura vial, sus características geométricas, la velocidad media de recorrido, la composición del tránsito y las variaciones de flujo. Por lo que toca al Nivel de Servicio, los factores adicionales que se requieren incluyen la densidad, la velocidad media de recorrido, las demoras y la relación flujo a Capacidad.
- ⇒ Por razones prácticas se han fijado valores de densidades, velocidades medias de recorrido, demoras y las relaciones de flujo a Capacidad, que definen los Niveles de Servicio para autopistas, autopistas de carriles múltiples, autopistas de dos carriles, calles urbanas, intersecciones con semáforos e intersecciones sin semáforos de prioridad.
- ⇒ El criterio utilizado para una identificación práctica de los Niveles de Servicio de las diversas infraestructuras viales, establece que se deben considerar las medidas de eficiencia mostradas en la Tabla 3.4-1 Medidas de Eficiencia.



### 3.4.2 Medidas de eficiencia para la definición de los Niveles de Servicio

Tabla 3.4-1 Medidas de Eficiencia

Tipo de infraestructura vial	Medidas de eficiencia
<b><u>Autopistas</u></b>	
Segmentos Básicos	Densidad, velocidad, relación volumen a Capacidad
<b>Tramos de Entrecruzamientos</b>	
Rampas de enlaces	Densidad
<b><u>Carreteras</u></b>	
Múltiples carriles	Densidad, velocidad, relación volumen a Capacidad
Dos carriles	Velocidad, % de tiempo de seguimiento
<b><u>Intersecciones</u></b>	
Con semáforos	Demora por controles
De prioridad	Demora por controles
<b><u>Arterias urbanas</u></b>	
Transporte colectivo	Frecuencia, horas de Servicio, carga de pasajeros
Ciclo rutas	Eventos, demoras, velocidad
Peatones	Espacio, eventos, demoras, velocidad

Fuente: TRB, Highway Capacity Manual. HCM2000.

Para propósitos de esta tesis solo se desarrollan tres tipos de infraestructura de autopistas, es decir:

- ⇒ Segmentos Básicos
- ⇒ Tramos de entrecruzamientos (Trenzado)
- ⇒ Rampas de enlaces

