

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
SECCION INGENIERIA DE TRANSPORTE**

MEDICION DE PARAMETROS DE TRANSITO

Eduardo Valenzuela Freraut

ST-DOC/01/99

SANTIAGO - CHILE
1999

INDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	3
CONCEPTOS BÁSICOS.....	3
PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO	4
DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO MUESTRAL	6
MEDICION DE FLUJOS.....	8
MEDICIONES AUTOMÁTICAS	8
CONTEOS MANUALES	8
INFORMACIÓN NECESARIA DE RECOLECTAR	9
MEDICION DE TASA DE OCUPACION.....	12
TRANSPORTE PÚBLICO	12
VEHÍCULOS LIVIANOS.....	12
MEDICION DE LONGITUDES DE COLA.....	14
COLAS EXCEDENTES.....	14
COLAS MÁXIMAS	14
COLAS PROMEDIO	14
MEDICION DE VELOCIDAD.....	15
VELOCIDAD INSTANTÁNEA	15
VELOCIDAD DE RECORRIDO Y DE VIAJE	15
MEDICION DE FLUJO DE SATURACION	17
INTRODUCCIÓN	17
MÉTODO TRADICIONAL.....	17
MÉTODO DE BRANSTON Y VAN ZUYLEN.....	21
MÉTODO DEL ROAD RESEARCH LABORATORY	22
INTERSECCIONES PRIORITARIAS Y ROTONDAS	23

INTRODUCCION

Con frecuencia en la práctica estamos interesados en extraer conclusiones válidas respecto a cierta variable de transporte (longitud de cola, tasa de ocupación, flujo vehicular, origen y destino del viaje, etc.). En muchos casos, el examinar al grupo entero (población) resulta imposible debido a restricciones de tiempo y/o presupuesto. Entonces, se recurre a examinar un conjunto de dicho grupo (muestra). Esto se realiza con la finalidad de inferir hechos respecto de la población a partir de los resultados hallados en la muestra, proceso conocido como *inferencia estadística*.

El considerar una muestra en vez de un censo ahorra dinero, tiempo de selección de personal, tiempo de capacitación y tiempo de trabajo de campo. Adicionalmente, una muestra puede ser más precisa, producto de la inexistencia de *errores no muestrales*: en un censo se necesitan más entrevistadores o medidores, más supervisores de campo, más personal que procese los formularios para digitalarlos y más digitadores. A medida que crece el estudio, crece el personal, disminuyendo la capacidad de supervisión y haciéndose más difícil un control de sus actividades. Además, un censo puede tomar tanto tiempo que las condiciones de interés del fenómeno analizado pueden haber variado significativamente.

Una muestra también tiene asociado un error no muestral, pero en un grado menor. A diferencia del censo, la muestra proporciona un error muestral. Por lo tanto, puede ser más precisa que un censo, si el total de los errores muestrales y no muestrales de la muestra son menores que los errores no muestrales del censo.

Conceptos Básicos

Por **elemento** se entiende a la unidad de la cual se solicita información. Este elemento, suministra la base de análisis que se llevará a cabo. En ingeniería de tránsito, un elemento puede ser un individuo, un viaje, la familia, el hogar, el vehículo, entre otros. La **población** es el agregado de todos los elementos definidos antes de la selección de una muestra. Una **unidad de muestreo** hace referencia a que ningún elemento de la población puede ser muestreado más de una vez, pero con oportunidad de ser seleccionado en la muestra (colección de elementos de una población con representación total de la misma). El **marco muestral** corresponde a la lista de todas las unidades de muestreo disponibles para selección en la etapa de muestreo. Un marco muestral puede ser una lista de votantes, una ciudad, un eje vial, etc. Con frecuencia la disponibilidad de un marco muestral define la población, puesto que no existe un ajuste perfecto entre la población y el marco.

Una población adecuadamente designada debe ser definida en términos de elementos, unidades de muestreo, alcance y tiempo. Por ejemplo: medir flujo vehicular (elemento) clasificado en vehículos livianos y transporte público (unidades

de muestreo) en calle Tomás Moro con calle Lolco (alcance) entre las 7:30 y las 8:30 de un Martes (tiempo).

Los pasos para seleccionar una muestra son (1) definir la población (elementos, unidades de muestreo, alcance y tiempo), (2) identificar el marco muestral del cual se sacará la muestra, (3) definir el tamaño muestral, (4) seleccionar un procedimiento de selección de la muestra o muestreo, y (5) selección de la muestra o ejecución.

Procedimientos de Muestreo

Existen diversos procedimientos mediante los cuales es posible seleccionar la muestra, dependiendo de si el método es probabilístico o no probabilístico.

En un muestreo probabilístico, cada elemento de la población tiene una oportunidad conocida de ser seleccionado para la muestra. El muestreo se hace mediante reglas matemáticas de decisión que no permiten discreción al investigador, permitiendo calcular el grado hasta el cual el valor de la muestra puede diferir del valor de interés en la población. Esta diferencia recibe el nombre de error muestral.

En el muestreo no probabilístico, la selección de un elemento de la población para que forme parte de la muestra se basa en el juicio del investigador o entrevistador de campo. No existe una oportunidad conocida de que cualquier elemento particular de la población sea seleccionado. Por lo tanto, es imposible calcular el error muestral que ocurre.

Existen varios procedimientos de muestreo dependiendo de la categoría del método. Para el muestreo no probabilístico, existe el muestreo de conveniencia, de juicios y por cuotas.

Muestreo por conveniencia. Como su nombre lo indica, las muestras se seleccionan de acuerdo a la conveniencia del investigador: solicitar la opinión de peatones respecto de diseño físico de paraderos de transporte público, utilizar grupos de estudiantes o de tercera edad para analizar diseño de accesos al metro, etc. En todos los casos no se especifica la población de la cual se ha tomado la muestra real. Sólo aquellos que se encontraban en el sitio en donde se escogió la muestra, tienen la posibilidad de ser seleccionados, desconociéndose la probabilidad exacta de que estas personas sean seleccionadas.

Muestreo de juicio. Estas muestras se seleccionan de acuerdo a la opinión de algún experto acerca de la contribución de esos elementos de muestreo. Nuevamente se desconoce el grado y dirección del error, no siendo significativas las afirmaciones definitivas. Para el ejemplo anterior, seleccionar individuos en los paraderos de Avda. Libertador Bernardo O'Higgins, como representativos de la población.

Muestreo por cuotas. Este muestreo es un tipo especial del muestreo por juicio. En este caso, el experto selecciona los elementos con el fin de obtener una muestra similar a la población en alguna característica de interés, anteriormente especificada. Por ejemplo, nos interesa conocer la opinión de los usuarios del transporte público respecto del nivel de servicio que presta, considerando como variable de control la edad de la población y su sexo. Entonces, a partir información de un censo de población de la zona geográfica considerada, es factible seleccionar hombres y mujeres de las edades que corresponda para replicar la proporción de la población.

Por otro lado, para el muestreo probabilístico existe el muestreo aleatorio simple, estratificado, por conglomerados, sistemático y por áreas.

Muestreo aleatorio simple. Existen dos condiciones que definen la existencia del muestreo aleatorio simple: (1) cada elemento tiene igual oportunidad de ser seleccionado y (2) cada combinación de los n elementos muestrales tiene igual oportunidad de seleccionarse. Por ejemplo, se desea medir la brecha promedio en la rama secundaria de una intersección de prioridad. La elección del vehículo a registrar es según orden de llegada a la línea de parada.

Muestreo estratificado. Se obtiene mediante la separación de los elementos que conforman la población en subgrupos que presenten las mismas características, comúnmente denominados estratos y tiene como rasgo fundamental el hecho de que pueden llevar una disminución en el error estándar estimado. Los estratos deben ser mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos. Al interior de cada estrato la selección es aleatoria simple. Por ejemplo, para la medición de la brecha promedio, se definen grupos según clasificación de vehículos: vehículos livianos, transporte público, camiones. Al interior de cada grupo se elige según orden de llegada a la línea de parada.

Muestreo por conglomerados. En los métodos de muestreo anteriores, se seleccionan individualmente los elementos que conforman la muestra. En este caso, un conglomerado o grupo de elementos se selecciona aleatoriamente a un mismo tiempo. Por lo tanto, antes de poder seleccionar una muestra por conglomerados, debe dividirse la población en grupos mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos. Entonces, seleccionar una muestra aleatoria de estos grupos. Por ejemplo, entrevistar a cierta cantidad de pasajeros de transporte público respecto del nivel de servicio del modo: los conglomerados son los buses, grupos mutuamente excluyentes, y en su conjunto (todos los buses que circulan) son exhaustivos. La muestra es aleatoria al escoger el bus y aleatoria al escoger los pasajeros del bus.

Muestreo sistemático. En este muestreo, el investigador selecciona cada k -ésimo elemento en el marco muestral, luego de comenzar el proceso aleatorio en alguna parte de los primeros k elementos. Para el ejemplo de estimación de la brecha crítica, seleccionar 1 de cada 5 vehículos que lleguen a la línea de parada.

Muestreo por áreas. Este es un tipo de muestreo especial por cuanto relaciona el elemento de la muestra con un lugar físico de ubicación geográfica. Una muestra por áreas puede tener el número de etapas que el investigador desee. Los pasos a seguir en el caso de dos etapas son: (1) enumerar las manzanas de la zona geográfica considerada como marco muestral, (2) escoger una muestra aleatoria simple o sistemática de manzanas, (3) enumerar los hogares localizados en las manzanas seleccionadas, (4) escoger una muestra aleatoria simple o sistemática de hogares en cada manzana seleccionada.

Determinación del Tamaño Muestral

La presente sección tiene por finalidad dar fórmulas claves para la determinación del tamaño de muestra, facilitar su memorización, y utilizarse como material de consulta rápida, mayores antecedentes pueden encontrarse en Jany (1994) o en Kinneary y Taylor (1989).

Muestreo Aleatorio Simple.

Ecuación 1

$$n = \frac{n_o}{1 + \frac{n_o}{N}}$$

Ecuación 2

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

Muestreo Proporcional.

Poblaciones Infinitas

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

Poblaciones Finitas

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

Muestreo Sistemático.

Ecuación 3

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

donde:

población finita se considera toda población igual o inferior a 30.000 elementos

e	=	error de estimación
K	=	número posible de muestras
N	=	Población
n	=	tamaño de la muestra
n_0	=	primera aproximación de n
P	=	probabilidad que el evento ocurra
Q	=	probabilidad que el evento no ocurra (1-P)
S	=	desviación
Z	=	área bajo la curva normal

MEDICION DE FLUJOS

Existen dos formas de realizar las mediciones de flujos: en forma manual o por medios automáticos.

Mediciones Automáticas

Se realizan sobre los ejes arteriales y no permiten distinguir con precisión los tipos de vehículos circulantes. Son apropiadas para situaciones en las que interesa registrar flujos continuos durante largos períodos, no siendo posible distinguir movimientos. Entre los instrumentos más utilizados se encuentran los clasificadores, que pueden distinguir automáticamente entre tres y cinco distintos tipos de vehículos por sus longitudes. Sin embargo, la desagregación por longitud del vehículo es inapropiada para todo efecto práctico, ya que no es posible distinguir entre buses y camiones, o entre buses locales e interurbanos, entre otras clasificaciones posibles. Con esto, es necesario realizar clasificaciones manuales de vehículos según la desagregación requerida, durante alguna hora representativa, al menos durante dos cuartos de hora no consecutivos.

Especial interés posee la ubicación de las espiras inductivas (o mangueras, si los equipos son más antiguos) en la vía. Una ubicación incorrecta de éstas puede significar registrar más ejes de los que efectivamente circulan en una dirección específica (los ejes que adelantan en sentido contrario, por ejemplo), produciendo mediciones erróneas.

Conteos Manuales

Estos conteos son más apropiados en intersecciones, pudiendo identificar los movimientos relevantes. Además, la clasificación según tipología de vehículos es automática. Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta son las siguientes.

- ✓ Los conteos deben subdividirse en períodos de 15 minutos, salvo que sean mediciones continuas de largo aliento (días, semanas) o que sean requeridas para otros fines que obliguen a subdividir en períodos menores;
- ✓ Un observador no debiera contar más de 400 vehículos por hora, salvo que la medición sea en una sección de la vía (no identifica movimiento);
- ✓ Es recomendable contar con un supervisor cada 15 medidores. Este se encarga de la capacitación del personal y lleva la bitácora del trabajo en terreno;

- ✓ Especial relevancia posee el diseño del formulario a utilizar. Este debe contar con un conjunto claro de instrucciones precisas para que el medidor obtenga respuesta rápida a sus dudas;
- ✓ Es aceptable, en función de las características de la red vial, no medir algunos flujos y obtenerlos por continuidad. Esto, sin embargo, sólo debe hacerse para flujos de magnitud considerable y que no hagan virajes en una intersección intermedia;
- ✓ En el caso de flujos peatonales o de bicicletas, es recomendable realizar las mediciones por medio de filmaciones. Normalmente no es necesario identificar el sentido del movimiento ya que los flujos están entremezclados. Además, no se representa el fenómeno de saturación ya que la oferta de espacio vial, salvo escasas ocasiones, es ilimitada (principalmente para peatones);
- ✓ Dependiendo de la ubicación geográfica y/o de la hora de medición, es conveniente incorporar dentro del equipo de trabajo paraguas, linternas, cronómetros, etc.

La medición de flujo vehicular puede ser continua o periódica. El objeto del primer tipo de medición es obtener la información necesaria para periodizar; el segundo tipo consiste en obtener los flujos vehiculares por período.

Normalmente las mediciones continuas de flujos vehiculares consideran un día de la semana (Martes a Jueves), el Sábado y el Domingo. Así, es posible obtener períodos representativos de los días laborales y fin de semana. Respecto del período nocturno, si explícitamente debe ser modelado, conviene realizar mediciones de noche y no cometer el error de asociarlo a algún período de baja demanda ya que los resultados del estudio pueden verse modificados en una magnitud relevante. Sin embargo, en transporte urbano (no así en estudios de transporte interurbano) normalmente no se modela el período nocturno.

Respecto de la asignación horaria, el año se divide en 8.760 horas ó 52 semanas si se estudia el período nocturno. De no ser así, se debe explicitar que período horario será considerado nocturno, por ejemplo, entre las 24:00 y 6:00 hr. Lo que implica que las horas al año serán menos, no así las semanas.

Información Necesaria de Recolectar

Si bien la información a recolectar dependerá de las características del estudio que se desee realizar, existe información que debe ser recopilada siempre: variables de ubicación espacio-temporal (fecha, hora de inicio y término, intersección o tramo si corresponde).

Respecto de las variables de flujo vehicular, éstas dependerán del estudio, registrando los movimientos y tipo de vehículo que correspondan.

Una clasificación no exhaustiva de la tipología vehicular es la siguiente, pudiendo considerar agregaciones dependiendo del estudio: vehículos particulares (vehículos de transporte escolar, camionetas, stations wagons, jeep), camiones simples (dos ejes), camiones pesados (tres o más ejes), taxis vacíos, taxis ocupados, taxis colectivos, taxibuses, buses.

Un punto de interés primordial es adiestrar adecuadamente a los medidores (encuestadores si es encuesta, censores si es censo), respecto de la clasificación adoptada, para evitar ambigüedades en el conteo (asignación del vehículo a cierta categoría según criterio del medidor).

Respecto del diseño del formulario, conviene que en los cuadros de conteo cada 15 minutos exista un espacio para el subtotal del cuarto de hora y otro para el total de la hora. Un ejemplo de formulario es el bosquejado en la figura N°1.

Es conveniente que todos los medidores utilicen los mismos símbolos para anotar en el formulario (palitos, cruces, etc.). El sistema generalmente utilizado consiste en que por cada vehículo que circula anotar un palo, de tal forma de ir formando cuadrados con una diagonal inscrita, lo que equivale a cinco vehículos, implicando mayor facilidad para sumar los subtotales. Sin embargo, si el flujo vehicular es elevado, cada palito puede valer por dos o más vehículos (no utilizar este procedimiento si el medidor mide más de un movimiento a la vez).

MEDICIÓN DE FLUJOS VEHICULARES

Nombre del Encuestador : _____

Punto o Sección: _____ Movimiento: _____ Fecha: _____ Hora Inicio: _____

Observaciones : _____

Esquema del Punto de Control

N
↑

C	Veh. Livianos	Taxis Col.	Bus/Taxi-Bus	Furgones Esc.	Bus Interurb.	Bus Institución	Camión 2 Ejes	Camión +2 Ejes	Bicicletas
1									
2									
3									
4									

Figura N°1: Esquema formulario medición de flujos

MEDICION DE TASA DE OCUPACION

Transporte Público

La obtención de tasas de ocupación (TOC, en adelante) en este caso presenta dificultades especiales por la imposibilidad físico – temporal de poder contar las personas que ocupan cada vehículo observado. En consecuencia, el observador registra la situación del vehículo según cinco grandes categorías. Previamente ha observado sobre los vehículos la carga promedio que esas categorías representan.

Se recomienda ubicar a los observadores en tramos homogéneos ya sea entre dos paraderos o en longitudes de 400 a 500 metros, en intervalos de 15 minutos que pueden ser agregados posteriormente.

Las categorías o los valores vigentes para Santiago, son los siguientes:

Categoría	Definición	Txb	Bus
A	Vehículo completamente ocupado, con pasajeros colgando	44,2	83,1
B	Más de la mitad del pasillo con pasajeros de pie	34,5	56,7
C	Menos de la mitad del pasillo con pasajeros de pie	27,3	41,6
D	Más de la mitad de los asientos ocupados	18,3	26,0
E	Menos de la mitad de los asientos ocupados	9,4	12,4

FUENTE: SECTRA 1988

Para determinar la TOC media, se debe calcular el promedio ponderado de los factores de ocupación promedio por categoría. Para el caso de otras ciudades, si los vehículos son diferentes, debe hacerse un muestreo previo a fin de determinar los pasajeros por vehículo correspondientes a cada categoría.

Valores aproximados para Santiago indican un coeficiente de variación de 0,2 lo que implica que se debieran tomar muestras de al menos 60 vehículos por hora, considerando un muestreo aleatorio simple.

Para evitar el sesgo muestral, se recomienda diseñar reglas sistemáticas de elección, del estilo: registrar 1 de cada 5 vehículos.

Vehículos Livianos

El proceso en estos casos es más sencillo dada la pequeña capacidad de los vehículos. Se registra directamente el número de pasajeros que ocupa el vehículo. La tasa de ocupación es el promedio de las cifras registradas. Es conveniente

ubicar al observador en lugares en donde se produzcan detenciones, con la finalidad de mejorar la observación del interior del vehículo.

Para evitar el sesgo muestral, se recomienda diseñar reglas sistemáticas de elección, del estilo: registrar 1 de cada 5 vehículos.

Cabe señalar que la TOC es necesaria para identificar viajes, no personas. Según esto, no debe contabilizarse al conductor.

Es conveniente realizar una experiencia piloto para dimensionar el tamaño de muestra requerido. Experiencias en Santiago indican que tamaños de muestra de 30 vehículos por hora son razonables.

MEDICION DE LONGITUDES DE COLA

Existen tres tipos de colas de vehículos que interesa medir: las colas excedentes y las colas máximas en nudos semaforizados, y las colas promedio en el caso de intersecciones prioritarias. En general, la medición de longitud de cola se utiliza para efectos de calibración de la herramienta con que se desea modelar la intersección. Por lo tanto, considerar la medición de la longitud de cola por acceso, por pista o por movimiento, dependerá de la forma de modelar cada situación.

Colas Excedentes

Su medición debe efectuarse, en lo posible, apoyados en filmaciones. El método consiste en contar todos los vehículos que se encuentran en cola al comienzo del rojo efectivo. Se recomiendan tamaños muestrales del orden de 30 observaciones (ciclos del semáforo en que existió cola excedente) como mínimo.

Colas Máximas

El método es similar al anterior con la salvedad que la determinación del número de vehículos en cola se realiza al comenzar el verde efectivo correspondiente.

Colas Promedio

Estas, en general, no son grandes ya que cuando lo son corresponde analizar la conveniencia de instalar semáforo. La idea es medir la cola promedio. Para lograr el objetivo se suponen intervalos de cinco minutos promediando la información recopilada. Esto implica unas 12 observaciones por hora. Si deseamos aminorar conteos, se mide alternativamente para distintos movimientos lo que implica reducir el número de observaciones por hora, recomendándose como mínimo unas 6 observaciones por movimiento por hora.

MEDICION DE VELOCIDAD

Es necesario estimar velocidades cuando va a haber cambios respecto a la situación actual ya sea por ensanches o agrandamiento de las vías, o porque se producirán reasignaciones de flujo que harán cambiar las velocidades existentes positiva o negativamente.

Se pueden distinguir al menos tres tipos de velocidad, las cuales representan fenómenos diferentes: velocidad instantánea (asociada a un punto), de corrido (asociada a un tramo dado y estando el vehículo en movimiento) y de viaje (asociada a una distancia y tiempo total, incluyendo tiempos de detención). La velocidad de recorrido y de viaje son variables agregadas; la primera desde el punto de vista de la circulación, la segunda desde el punto de vista del usuario.

Velocidad Instantánea

Los métodos más usuales son:

Radar: Usado para control de límite de velocidad (error ± 2 km/hr). Limitación: en circulación intensa es difícil apuntar a vehículo determinado. Es apto para vías interurbanas.

Fotografías aéreas: Consiste en tomar dos fotos con un desfase de tiempo dado. Conocida la distancia recorrida, se calcula la velocidad instantánea de varios vehículos.

Sensores Triboeléctricos: Son sensores puestos bajo el pavimento. Al pasar un vehículo produce una deformación que se transmite a un sensor el que produce una carga eléctrica. Dos sensores ubicados a cierta distancia producirán dos cargas eléctricas en un intervalo de tiempo.

Velocidad de recorrido y de viaje

En éstos casos se determinan tiempos de viaje (T_i) para un cierto tramo de longitud L de la vía. Para determinar la velocidad promedio, es posible promediar los tiempos (T_i) y luego calcular la velocidad como el cuociente entre la distancia recorrida y el tiempo promedio obtenido, o calcular, para cada tiempo de viaje la velocidad de recorrido y promediar estos últimos valores.

Normalmente se trabaja con muestras (subconjunto de vehículos medibles). Los métodos más usuales son:

Medición directa. Un observador con cronómetro que determina la diferencia de tiempo de viaje (δT), conocida la distancia (δL). Es barato pero sólo aplicable a tramos cortos ya que un error en la obtención de δT implica velocidades diferentes. Existen problemas de paralaje y el proceso es lento lo que implica considerar tamaños muestrales pequeños.

Método de las patentes. Este método consiste básicamente en ubicar observadores a la orilla de la vía, a fin de que anoten el número de la patente y el tiempo de pasada de cada vehículo motorizado, identificando su categoría (vehículo liviano, bus, camión de dos ejes, etc.). La gran desventaja de la técnica es el requerimiento computacional posterior para el análisis y procesamiento de la información. Para situaciones de alto flujo vehicular, normalmente se adopta anotar las patentes de sólo algunos dígitos en particular. Por ejemplo: los dígitos pares.

Este método permite obtener velocidades (o tiempos de viaje, conocida la distancia recorrida) para cada vehículo registrado, siendo la velocidad (o el tiempo de viaje) promedio, la media aritmética de las velocidades (tiempo de viaje) individuales. Se requiere que los cronómetros estén sincronizados. Al oscurecer es difícil ver la patente.

Método del Seguimiento. Este método consiste en utilizar un vehículo implementado con un registrador de eventos, de tal forma que el vehículo circule con el pelotón de vehículos y registre cada cierto intervalo de tiempo predefinido (normalmente cada 2 segundos), la distancia recorrida y el tiempo empleado. Con esto, la información posible de obtener es el tiempo de viaje del pelotón para cada tramo recorrido. Los inconvenientes principales consisten en que los resultados obtenidos estarán estrechamente ligados a la forma de conducción del vehículo y el número de observaciones normalmente es pequeño en comparación con otros métodos.

Filmación del Flujo. Método apto para tamaños muestrales grandes. El principal defecto es que el procesamiento de la información es lento y normalmente existen problemas para determinar los puntos que definen δL y δT .

MEDICION DE FLUJO DE SATURACION

Introducción

La capacidad de una sección de vía se define como el número máximo de vehículos que puede atravesarla por unidad de tiempo, en las condiciones prevalecientes de circulación. Con esto, la misma vía poseerá diversas capacidades según tipo de vehículo en la rama, según la regulación existente en la intersección aguas abajo, según la geometría de la vía, según las condiciones climáticas, etc.

Como la capacidad depende de cada caso en particular: tramo de vía sin intersección de un sentido, de doble sentido, intersección regulada con señal de prioridad o intersección semaforizada ; el método de obtención varía dependiendo de cada caso.

En transporte urbano, prácticamente nos interesan sólo los métodos asociados a intersecciones reguladas con señal de prioridad, rotondas y, principalmente a intersecciones semaforizadas. En este último caso, el proceso real se idealiza generando un diagrama binario, definiéndose tres parámetros: flujo de saturación (S), pérdida en la partida y ganancia de amarillo. Entonces, el proceso de obtención de la capacidad de una intersección semaforizada, pasa inicialmente por la determinación del flujo de saturación. A continuación se describe el método comúnmente utilizado.

Método Tradicional

El método para estimar S y los tiempos desaprovechados se basa en la observación de vehículos durante tres intervalos de un período de verde (MTT, 1983).

Primer Intervalo: los primeros 10 segundos (o 7 vehículos) del período de verde, los que corresponden a la transición inicial;

Intervalo Medio: el resto del período de verde SATURADO;

Ultimo Intervalo: el tiempo que sigue al fin del período verde, es decir; amarillo más el rojo siguiente.

Se deben tener en cuenta las consideraciones siguientes:

- ✓ Sólo deben contarse aquellos vehículos que formaban parte de la cola;
- ✓ El método puede usarse en semáforos con programación variable;
- ✓ Los flujos de saturación deben calcularse por pista.

El método utiliza el formulario adjunto para registrar la información. En él, aparecen seis columnas para anotar:

1. El número del ciclo
2. Los vehículos observados en el primer intervalo
3. Los vehículos observados en el intervalo medio
4. Los vehículos observados en el intervalo final
5. La duración del período saturado
6. La saturación del período verde. Si este es fijo, anotarlo sólo la primera vez.

Se cuenta a los vehículos a medida que cruzan la línea de detención, teniendo cuidado de contar sólo vehículos durante intervalos saturados. Para asegurarse de ello, verificar que sólo se cuentan vehículos que estaban en la cola al comienzo del verde, o que se unieron a ella y sufrieron una detención total durante el período de verde. **Sólo se cuentan vehículos que inician la marcha desde el reposo.** El tiempo de saturación incluye el intervalo inicial y el medio pero no el último intervalo. El tiempo de saturación termina cuando el último vehículo que partió del reposo cruza la línea de detención, o cuando se presenta el período de amarillo; lo que suceda antes.

Si el tiempo de saturación es menor a 10 segundos, deben excluirse las observaciones de ese ciclo. Los vehículos que utilizan el último intervalo sólo deben contabilizarse si el período estaba totalmente saturado (tiempo de saturación = tiempo de verde). Si ningún vehículo utiliza el último período anote un cero. Un signo (-) indica que el período no estaba saturado.

De la observación del formulario debe notarse que hay tres casos básicos.

1. Las columnas 1,2 y 3 tienen anotaciones. En este caso el ciclo estaba totalmente saturado.
2. Sólo la columna 1 o las columnas 1 y 2 tienen anotaciones. La cola duró al menos 10 segundos, pero fue despejada antes del período de verde.
3. No hay anotaciones en las columnas 2 y 3 y el número en la columna 1 se ha tachado, ya que el tiempo de saturación fue inferior a 10 segundos.

Las anotaciones deben repetirse mínimo por 30 ciclos y el TOTAL y el número de MUESTRAS deben computarse para cada columna. Si hay un número en el ciclo correspondiente (no tachado) esta denota una MUESTRA.

El flujo de saturación se calcula como

$$S = 3600 * \frac{X_2}{X_4 - 10 \cdot n_4}$$

de los datos del formulario, el flujo de saturación en vehículos por hora está dado por:

$$S = 3600 * \frac{290}{917 - 10 \cdot 28} = 1.640$$

El tiempo desaprovechado en segundos se calcula como:

$$I = E + 10 - \frac{1}{S} \cdot \left(\frac{X_1}{n_1} + \frac{X_3}{n_3} \right)$$

donde E es el entreverde observado al mismo tiempo. El tiempo de verde presentado promedio es

$$V = \frac{X_5}{n_5}$$

y el verde efectivo es $v = E + V - I$. Del formulario, se obtiene que $V = 34$ segundos y $v = 5 + 34 - 6 = 33$ segundos.

Si sólo se requieren flujos de saturación, basta con llenar las columnas 2 y 4. Si se requiere convertir el flujo de saturación a ADE/hr, es necesario contar vehículos separadamente por tipo (j) y por movimiento (k). Así,

$$X_i = \sum_{j,k} X_{ijk} \cdot f_j \cdot f_k$$

donde:

f_j = factor de equivalencia de vehículo tipo j

f_k = factor de equivalencia de movimiento tipo k.

**FORMULARIO MEDICION
FLUJO SATURACION Y TIEMPOS DESAPROVECHADOS**

NUMERO DEL CICLO	SALIDAS DE LAS COLAS (veh)			Duración Saturación* (seg)	Verde presentado (seg)
	Int. Inicial 1	Int. Medio 2	Int. Final 3		
1	3	12	1	35	35
2	4	3	0	20	20
3	3	6	-	24	29
4	3	-	-	10	14
5	1	-	-	0	12
6	4	10	-	34	46
7	3	23	1	52	52
8	3	14	-	44	53
9	3	10	2	34	34
10	2	8	1	27	27
11	2	4	-	18	33
12	3	8	-	25	30
13	4	6	-	22	27
14	3	4	-	21	34
15	3	15	0	45	45
16	2	17	3	52	52
17	3	18	1	52	52
18	3	10	-	25	26
19	4	12	2	38	38
20	3	9	1	37	37
21	4	66	-	23	28
22	2	-	-	0	10
23	3	9	1	20	20
24	3	18	0	46	46
25	3	19	-	45	48
26	2	10	1	32	32
27	4	-	-	10	13
28	4	7	-	24	29
29	2	15	1	50	50
30	3	17	1	52	52
TOTAL	X1 = 86	X2 = 290	X3 = 16	X4 = 917	X5 = 1024
MUESTRAS	n1 = 28	n2 = 26	n3 = 15	n4 = 28	n5 = 30

Entreverde = 5 segundos

* = excluye el amarillo

FUENTE: MTT, 1983

Método de Branston y Van Zuylen

En el método de Branston y Van Zuylen (1978), la unidad de medición es la pista, por cuanto los parámetros a estimar corresponden al proceso de salida de los vehículos que conforman la cola en una pista determinada.

Definiendo por:

- t_{si} al tiempo en segundos que transcurre entre la aparición de la verde para la pista en estudio y la pasada por la línea de detención del parachoques trasero del último vehículo que, formando parte de la cola, se descargó en el período de verde i -ésimo;
- v_i a la duración en segundos del i -ésimo período de verde;
- n_{ij} al número de vehículos del tipo j (definido por tipo y movimiento) que se descargaron en el período de verde i -ésimo;
- λ_{1i} la pérdida en segundos en la partida;
- λ_{2i} la ganancia en segundos de amarillo;
- β_j el intervalo característico de descarga a saturación de los vehículos de la clase j , en segundos;
- i 1, ..., m ;
- j 1, ..., k ;

Se debe cumplir que:

Ecuación 4

$$t_{si} = I_{1i} + \sum_j b_j n_{ij}$$

Ecuación 5

$$I_{2i} = \text{Máx}\{0; t_{si} - v_i\}$$

Tomando datos de t_{si} , v y n_{ij} para k ciclos de semáforo, λ_1 y β_j pueden ser estimados por regresión a partir de Ecuación 1.

Para λ_2 , un buen estimador es el promedio de los $\lambda_{2i} \neq 0$, determinados con Ecuación 2. Luego, el flujo de saturación (S) viene dado por:

Ecuación 6

$$S = \frac{1}{\hat{b}}$$

donde \hat{b} es el intervalo promedio de descarga a saturación de los vehículos.

Los datos necesarios de medir son sumamente simples. Si el semáforo es de tiempos prefijados, se debe verificar que la duración del verde sea estable entre ciclos y que no se produzcan cambios de programa dentro del período de medición. Si existe estabilidad en estos sentidos, basta medir una vez la duración del verde. En caso contrario, hay que medirlo en cada período en que la cola no se descargue antes de que éste termine.

La medición de n_{ij} es un sencillo conteo clasificado. Se debe salvaguardar que ésta no corresponda sólo al período de transición inicial. Se sugiere imponer un límite inferior de 8 vehículos para que el dato sea considerado en la regresión.

Un problema típico puede ser la presencia de bloqueo por congestión aguas abajo. Ante el menor indicio de bloqueo, la medición debe interrumpirse.

Método del Road Research Laboratory

El método es aplicable a semáforos de tiempos prefijados y variables, y consiste en registrar el número de vehículos que se descargan desde la cola en cortos intervalos sucesivos del período de verde, el cual incluye la duración del amarillo.

Un ejemplo típico de la variación del flujo de descarga desde la línea de parada, en cortos intervalos sucesivos de tiempo, para un período de verde saturado, es el mostrado en la Figura N°2. El promedio del flujo en los intervalos saturados de tiempo, excluyendo los intervalos de inicio y fin, equivale al flujo de saturación. El gráfico puede ser simplificado a una forma rectangular, considerando las líneas segmentadas, donde el alto equivale al flujo de saturación promedio y el área equivale al total de vehículos descargados durante el período saturado. El ancho del rectángulo se conoce como el período de verde efectivo, y la diferencia entre éste valor y el período de verde más el amarillo, equivale a los tiempos perdidos.

En el ejemplo, los períodos de verde son de la misma duración. Este es el caso de semáforos con señales de tiempo fijo y de semáforos actuados con tráfico pesado, aún cuando el método es aplicable a períodos de verde constantes o variables.

El concepto básico del método es (a) dividir la porción saturada de cada período de verde en intervalos cortos de tiempo y promediar los flujos dentro de estos intervalos saturados, excluyendo los efectos de la ganancia de amarillo y pérdida en la partida, obteniendo así una medida del flujo de saturación y (b) comparar los flujos en estos intervalos con los flujos correspondientes a la pérdida en la partida y ganancia de amarillo, en orden a estimar los tiempos perdidos.

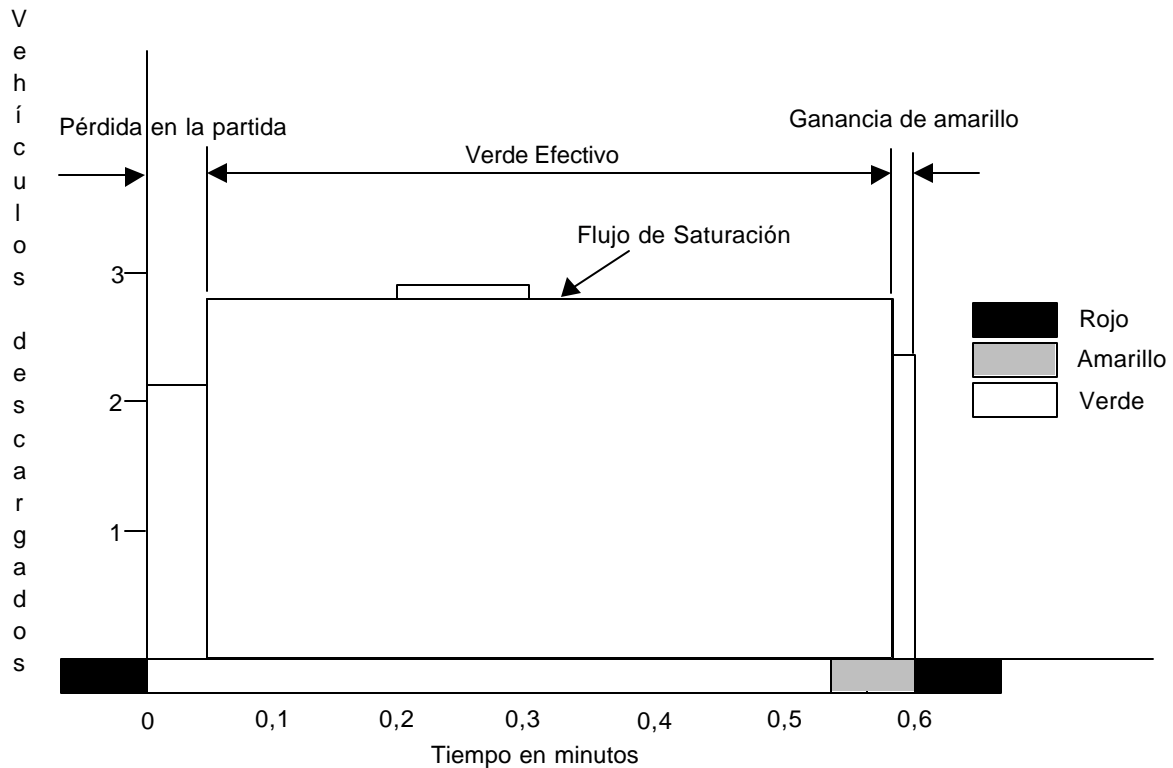


Figura N°2: Ejemplo descarga semáforo de tiempo fijo con saturación

El tiempo perdido en la partida equivale a la duración del primer intervalo de tiempo menos el tiempo requerido por el número de vehículos descargados en el primer intervalo para descargarse a una tasa similar al flujo de saturación estimado. De forma similar se debe estimar la ganancia de amarillo.

Intersecciones Prioritarias y Rotondas

Considerando el mismo principio aplicado a intersecciones semaforizadas, es factible determinar el flujo de saturación de la rama secundaria de una intersección de prioridad o rotonda. El método consiste en contabilizar, **mientras exista cola** en la rama secundaria, el número de vehículos que egresa y el tiempo que demoran en hacerlo.

El tiempo que demoran en egresar se mide desde que sale el primer vehículo en cola, hasta que lo hace el último vehículo de la misma cola. Así, la división entre el flujo que egresó menos el primer vehículo y el tiempo que demoraron en hacerlo, equivale directamente a la capacidad de la rama secundaria. Esta medición corresponde a una observación, siendo necesario repetir el experimento en al menos 30 ocasiones. El promedio obtenido equivaldrá a la capacidad promedio de la rama secundaria de la intersección o rotonda.

Para determinar el flujo de saturación a partir de ésta estimación de la capacidad de la vía, es necesario realizar una analogía con una intersección semaforizada, en cuyo caso la capacidad puede expresarse como

BIBLIOGRAFIA

Branston, D. y H. Van Zuylen (1978) The estimation of saturation flow, effective green time and passenger car equivalents at traffic signals by multiple linear regression. *Transportation Research* **12**, 47-53.

Jany, J. (1994) Investigación Integral de Mercados: Un enfoque operativo. McGraw-Kill, 1994.

Kinnear, Thomas y Taylor, James (1989) Investigación de Mercados: Un enfoque aplicado. McGraw-Kill, 1989.

MTT (1983) Manual de Señalización de Tránsito.

Road Research Laboratory (1963) A method of measuring saturation flow at traffic signals. Road Note 34, HMSO, London.

SECTRA (1988) Manual de Diseño y Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana.