



■ TEMA:

MODELACIÓN DEL TRANSPORTE URBANO

■ PROFESOR:

ING. JUAN CARLOS DEXTRE

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

COORDINADOR DEL ÁREA DE TRANSPORTE



“EL TRANSPORTE EN AREAS URBANAS”

□ CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRANSPORTE

- ***Es un bien altamente cualitativo y diferenciado***
 - *distintos propósitos de viaje*
 - *a diferentes horas del día*
 - *diferentes medios de transporte*
 - *diferentes tipos de carga*
- ***La demanda de transporte es “derivada”***
 - *Los viajes se producen por la necesidad de llevar a cabo ciertas actividades*
- ***La demanda de transporte está localizada en el espacio***
 - *Por lo general se divide el área de estudio en zonas y se define una red de transporte estratégica*



CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRANSPORTE

- ***La demanda de transporte es eminentemente dinámica***
 - *pocas horas disponibles para realizar las actividades*
 - *no se pueden hacer reservas, si no se consumen se pierden*
 - *problemas en los periodos puntas por gran demanda*
 - *desequilibrios fuera de los periodos punta con menores requerimientos*



CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRANSPORTE

- ***Para satisfacer la demanda es necesario proveer infraestructura y vehículos apropiados***
 - *infraestructura y los vehículos no pertenecen ni son operados por la misma compañía*
 - *se generan un conjunto de interacciones entre los operadores, autoridades del gobierno (central y local), constructoras, viajeros y público en general*
 - *los intereses políticos y económicos no permiten definir políticas coherentes para el sector*



CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRANSPORTE

- ***La construcción de infraestructura toma largo tiempo***
 - ***gran cantidad de recursos***
 - ***la planificación debe hacerse con extremo cuidado***
 - ***los planes deben ser flexibles para adecuarse a las condiciones cambiantes de país***
- ***Finalmente, la oferta de transporte tiene asociadas una variedad de efectos negativos***
 - ***accidentes***
 - ***contaminación***
 - ***deterioro de la calidad de vida urbana***
 - ***diseños no inclusivos***



EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE URBANO

- ***La sociedad reconoce que los problemas de transporte son más comunes y severos***
- ***Se tienen problemas tanto en países industrializados como en países en desarrollo***
- ***El aumento del tráfico ha originado externalidades***
- ***Los problemas no desaparecerán en el futuro y es importante no cometer los mismos errores ya cometidos por los países industrializados***



EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE URBANO

□ *Definición de un modelo simple*

$$v = f(K, V)$$

con

v = velocidad en un enlace de la red

K = capacidad

V = volumen de tráfico

$$v = f(K, V, G)$$

en que

v = velocidad en la red

G = sistema de gestión



EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE URBANO

notemos que la distancia (d) puede expresarse como

$$d = f(G)$$

*aún cuando aumente la velocidad dado un G exitoso,
es posible que aumente el tiempo de viaje debido a un
mayor d*

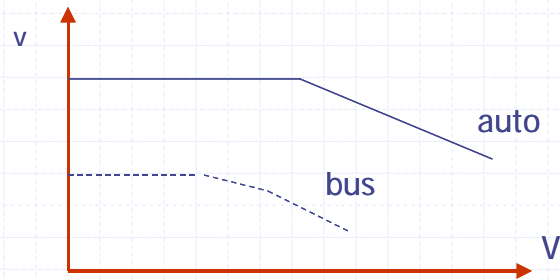


EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE URBANO

considerando que existen distintos vehículos, entonces

$$V = V_a + V_b + V_c$$

donde a = auto; b = bus; c = camión ; cada uno tiene distintas características de operación



EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE URBANO

Vale decir que es posible tener que

$$v_a = f(K, V_a, V_b, V_c, G)$$
$$v_b = f_1(K, V_a, V_b, V_c, G)$$

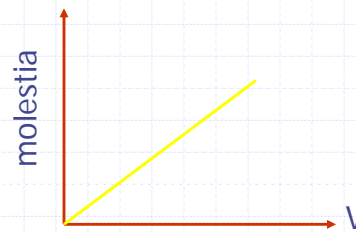
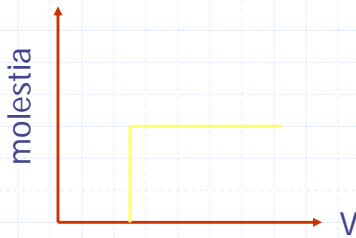
es posible dar prioridad a los buses mediante la asignación de pistas exclusivas; en este caso se otorga un K_b a fin de mejorar v_b , haciéndola independiente de V_a y V_c

$$v_b = f_2(K_b, G)$$



EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE URBANO

- **Externalidades tales como la contaminación ambiental**
 - *No se tiene claro cual es la forma funcional más adecuada*



EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE URBANO

- *Lo grave es que, dependiendo de esta forma puede variar fuertemente el resultado de la evaluación socio-económica de un proyecto*
- *Por esto, hasta ahora no se han incluido las consideraciones ambientales como ítems de costo-beneficio, sino como estándares que no se debieran sobrepasar*
- *Efectos distribucionales: quiénes se ven afectados positiva y negativamente por determinadas políticas o proyectos*



Modelación del Transporte

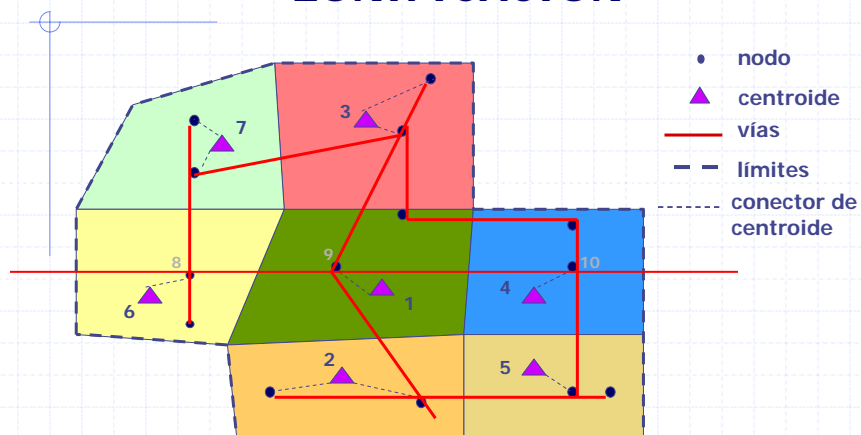
Modelo --> representación simplificada de la realidad

Información.-

- 1.- Área de estudio (zonificación)
- 2.- Geometría de la red vial
- 3.- Actividades urbanas
- 4.- Demanda de viajes



ZONIFICACIÓN





ZONIFICACIÓN

El sistema de zonas permite trabajar en grupos más manejables desde el punto de vista de la modelación

Nodo.- representa a una intersección del sistema vial

Centroide.- se asume que las actividades de la zona de estudio se concentran en este punto. Cada centroide se conecta con por lo menos un nodo

Vías.- es la representación simplificada del sistema vial

Límites.- es el borde que encierra al área de estudio



ACTIVIDADES URBANAS

Luego de dividir el área de estudio en zonas, es necesario tener información acerca de las actividades en esas áreas.

- Densidad residencial
- Cantidad de empleos en las zonas
- Servicios (educativos, salud, entretenimiento)
- Comercio

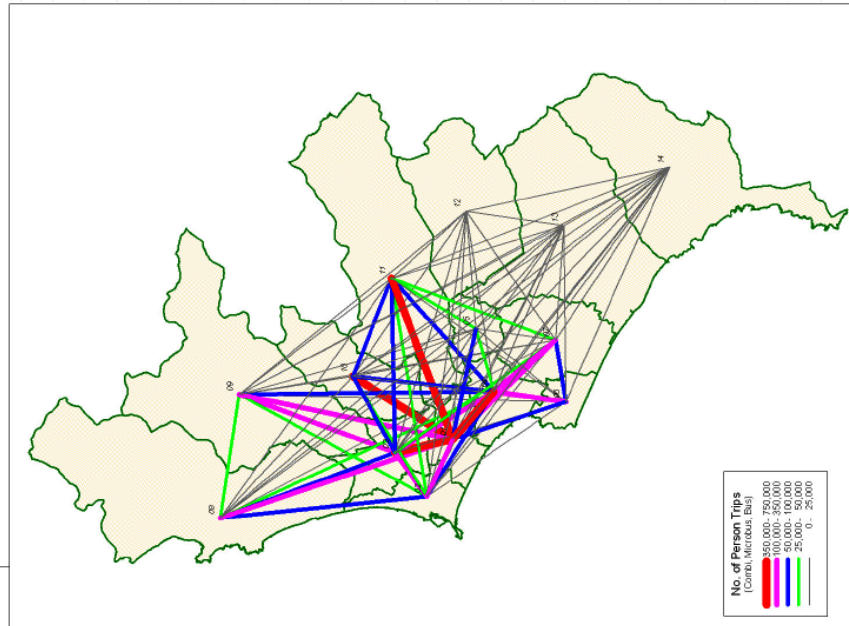


DEMANDA DE VIAJES

Es necesario saber cual es la demanda de viajes diarios de la zona de estudio. Esto se puede conseguir mediante una encuesta a una muestra de hogares.

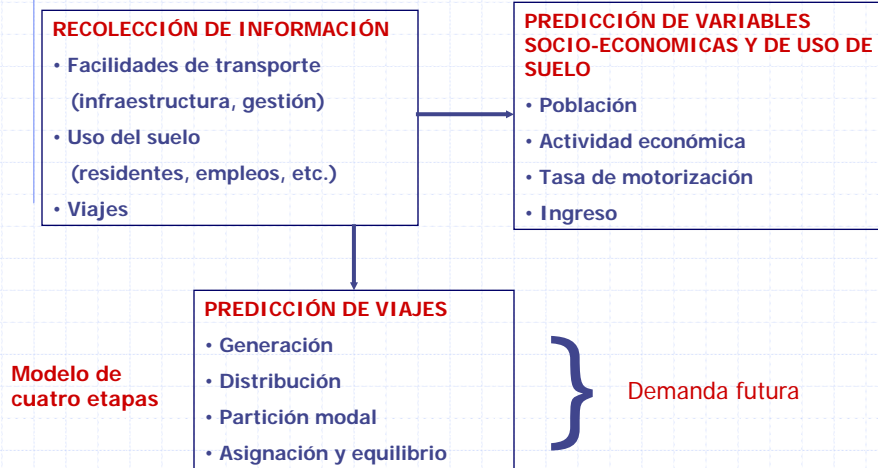
| Modo | No. de Viajes (1,000) | % del Total | % de Público/Privado |
|--------------------|-----------------------|--------------|----------------------|
| Caminar | 4,208 | 25.4 | |
| Modo Privado | 2,122 | 12.8 | 100.0 |
| Bicicleta | 84 | 0.5 | 4.0 |
| Motocicleta | 30 | 0.2 | 1.4 |
| Carro | 1,856 | 11.2 | 87.5 |
| Otros | 152 | 0.9 | 7.2 |
| "Taxi - Colectivo" | 1,683 | 10.2 | 100.0 |
| Mototaxi | 600 | 3.6 | 35.7 |
| Taxi | 902 | 5.5 | 53.6 |
| Colectivo | 181 | 1.1 | 10.7 |
| Modo Público | 8,525 | 51.5 | 100.0 |
| Combi | 3,791 | 22.9 | 44.5 |
| Microbús | 3,072 | 18.6 | 36.0 |
| Bus | 1,661 | 10.0 | 19.5 |
| Total | 16,538 | 100.0 | - |

Fuente: Yachiyo 2005





ESTRUCTURA GENERAL DEL MODELO DE TRANSPORTE URBANO



GENERACIÓN DE VIAJES

Definiciones:

Viaje.- movimiento en un sentido, desde un punto de origen a un punto de destino



Podría ser necesario cambiar de vehículo o caminar un tramo del viaje

Viajes basados en el hogar (HB).- uno de los extremos del viaje es el hogar

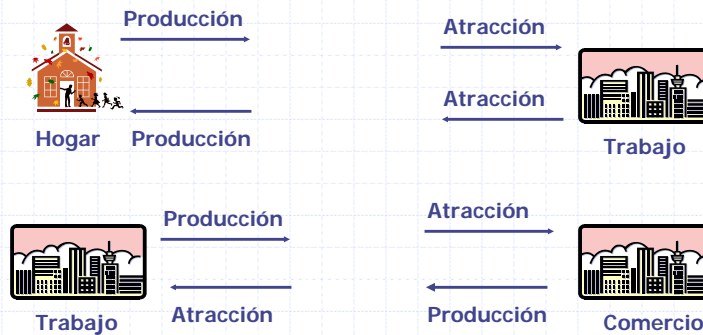
Viajes no-basados en el hogar (NHB).- no tiene un extremo en el hogar



Producción y Atracción de viajes

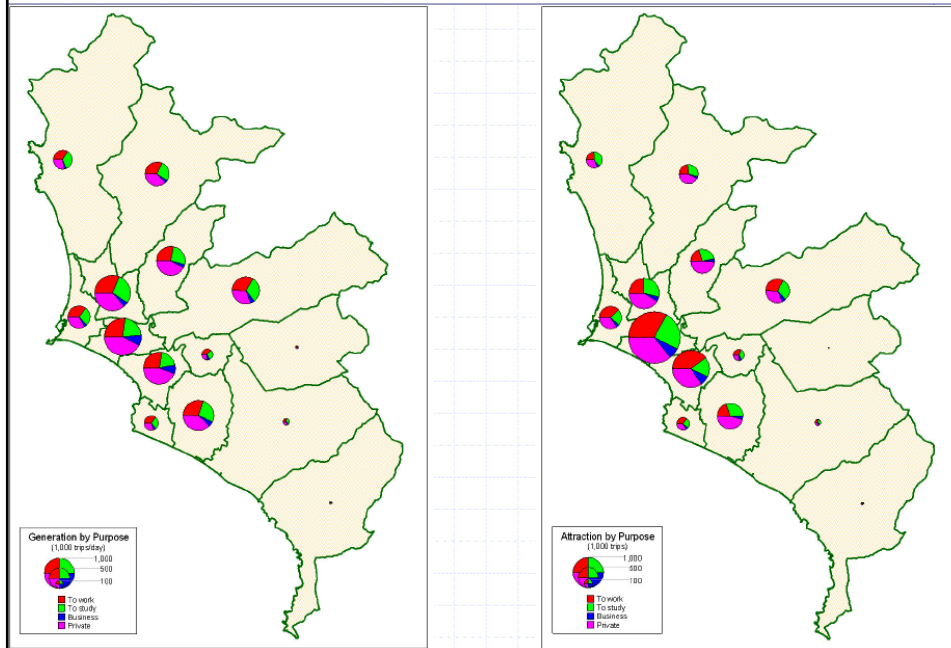
Producción de viajes.- se define como el extremo hogar de un viaje HB, o el origen de un viaje NHB

Atracción de viajes.- se define como el extremo no-hogar de un viaje HB, o el destino de un viaje NHB



GENERACIÓN DE VIAJES

- Se estima el número de viajes originados en cada zona O_i y el número de viajes atraídos en cada zona D_j
- Se asume que los viajes son simétricos
- Los viajes pueden ser:
 - Al trabajo
 - A la escuela o universidad
 - A las tiendas
 - Sociales o recreacionales
- Se distinguen viajes obligatorios y viajes opcionales



GENERACIÓN DE VIAJES

- Factores que influyen en el número de viajes:
 - Ingreso familiar
 - Autos propios
 - Tamaño y estructura del hogar
 - Densidad residencial
 - Accesibilidad



GENERACIÓN DE VIAJES

Método del factor de crecimiento:

$$T_i = F_i t_i$$

| | |
|-------|------------------------------------|
| T_i | # de futuros viajes de la zona i |
| t_i | # actual de viajes de la zona i |
| F_i | factor de crecimiento de la zona i |

El factor de crecimiento F_i se relaciona con variables tales como: población, ingreso y tasa de motorización



EJEMPLO

Considérese una zona con 500 hogares divididos en dos grupos (con y sin auto), en que cada grupo representa actualmente el 50% de la población. Además, supongamos que se conocen las tasas de generación de viajes de cada grupo:

Los hogares con auto producen 6 viajes/día

Los hogares sin auto producen 2.5 viajes/día

También supongamos que a futuro todos los hogares van a tener auto; con esto, se tendrían las siguientes situaciones:

| Actual | Futura |
|----------------------|----------------------|
| 250 hogares (0 auto) | 500 hogares (1 auto) |
| 250 hogares (1 auto) | |



EJEMPLO

La cantidad actual de viajes al día es:

$$t_i = 250 \times 2.5 + 250 \times 6 = 2,125 \text{ viajes/día}$$

Suponiendo que la población y el ingreso se mantendrán constantes a futuro, podríamos estimar el factor de crecimiento de la siguiente forma:

$$F_i = \frac{\text{Tasa de motorización futura}}{\text{Tasa de motorización actual}} = \frac{1}{0.5} = 2$$

$$T_i = F_i \times t_i = 2 \times 2,125 = 4,250 \text{ viajes/día}$$

Para verificar su bondad predictiva, podemos recurrir a nuestra información sobre las tasas de viaje. Si suponemos que éstas se mantienen constantes, a futuro habría 500 hogares con auto, esto es:

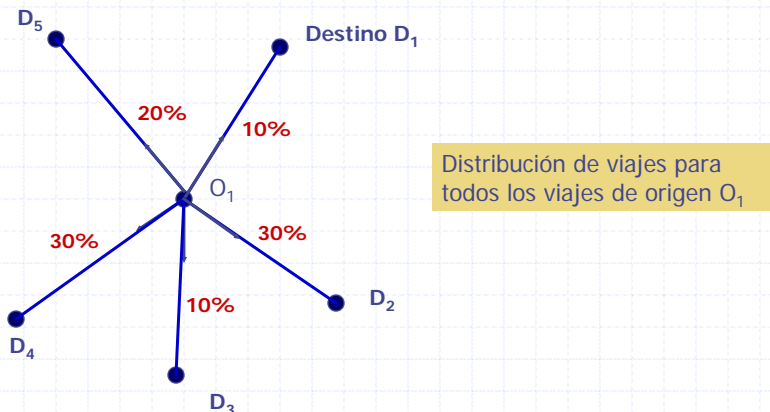
$$T_i = 500 \times 6 = 3,000 \text{ viajes/día}$$

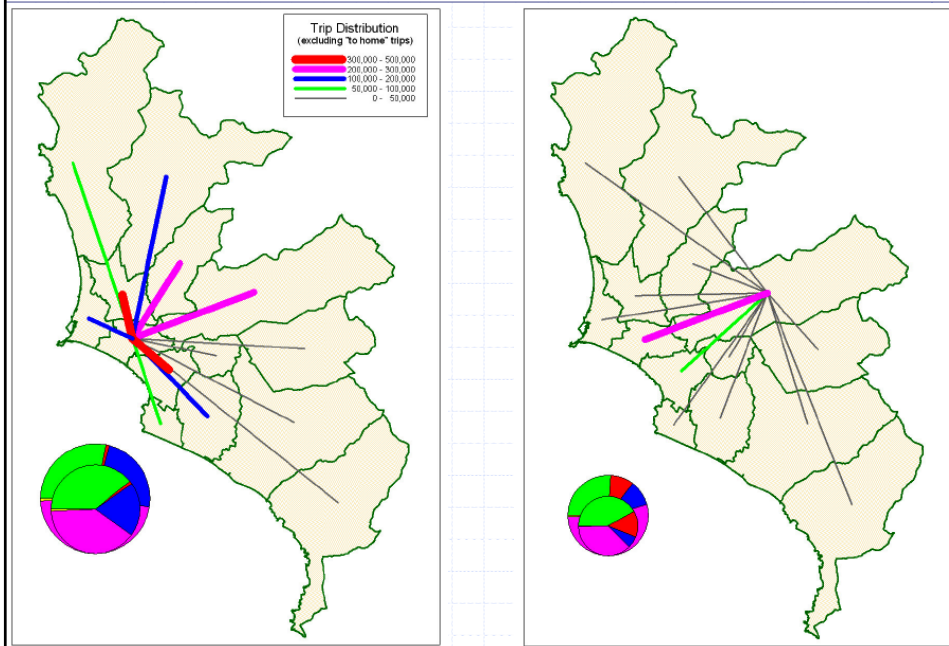
Vale decir, que el modelo sobreestimaría en 41.7% la cantidad de viajes futuros



DISTRIBUCIÓN DE VIAJES

Es el número de viajes realizados entre las zonas de un área de estudio





MÉTODO DEL FACTOR DE CRECIMIENTO

$$T_{ij} = t_{ij} \times F$$

T_{ij} # de viajes de la zona i a la zona j a ser estimados

t_{ij} # de viajes de la zona i a la zona j al año base

F Factor de crecimiento general para todos los viajes

$$\sum_j T_{ij} = O_i$$

$$\sum_i T_{ij} = D_j$$

El problema de este modelo es que no se cumplen las expresiones anteriores



EJEMPLO

| zonas | zonas | | | |
|-------|------------|------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 | O_i |
| 1 | 100 | 250 | 500 | 850 |
| 2 | 200 | 400 | 1100 | 1700 |
| 3 | 50 | 150 | 150 | 350 |
| D_j | 350 | 800 | 1750 | 2900 |

De un modelo de generación de viajes se pronostica

| | zonas | | | |
|----------------|-------|------|------|----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| O_i (futuro) | 1000 | 2000 | 500 | $\Sigma O_i = 3,500$ |
| D_j (futuro) | 500 | 1000 | 2000 | $\Sigma D_j = 3,500$ |



EJEMPLO

Calcular la nueva matriz mediante el método del crecimiento uniforme

$$F = 3,500 / 2,900 = 1.207$$

| zonas | zonas | | | |
|-------|------------|------------|-------------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | O_i |
| 1 | 121 | 302 | 604 | 1027 |
| 2 | 241 | 483 | 1328 | 2052 |
| 3 | 60 | 181 | 181 | 422 |
| D_j | 422 | 966 | 2113 | 3,051 |

| | zonas | | |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| O_i (futuro) | 1000 | 2000 | 500 |
| D_j (futuro) | 500 | 1000 | 2000 |



MÉTODO DE FURNESS

requiere el cálculo de sucesivas matrices de viajes por iteraciones

$$T_{ij}^{(1)} = \frac{O_i t_{ij}}{\sum_{K=1}^n t_{iK}}$$

$$T_{ij}^{(2)} = \frac{D_j T_{ij}^{(1)}}{\sum_{K=1}^n T_{Kj}^{(1)}}$$



EJEMPLO

| zonas | zonas | | | $\sum_k t_{ik}$ |
|-----------------|-------|-----|------|-----------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 100 | 250 | 500 | 850 |
| 2 | 200 | 400 | 1100 | 1700 |
| 3 | 50 | 150 | 150 | 350 |
| $\sum_k t_{kj}$ | 350 | 800 | 1750 | 2900 |

| | zonas | | |
|----------------|-------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| O_i (futuro) | 1000 | 2000 | 500 |
| D_j (futuro) | 500 | 1000 | 2000 |

$$T_{ij}^{(1)} = \frac{O_i t_{ij}}{\sum_{K=1}^n t_{iK}} \quad T_{11}^{(1)} = \frac{O_1 t_{11}}{\sum_{K=1}^n t_{1K}} = \frac{1000 \times 100}{850} = 117.6$$

$$T_{12}^{(1)} = \frac{1000 \times 250}{850} = 294.1 \quad T_{13}^{(1)} = \frac{1000 \times 500}{850} = 588.2$$



$T_{ij}^{(1)}$

| zonas | zonas | | | O_i |
|-------|-------|-------|--------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 117.6 | 294.1 | 588.2 | |
| 2 | 235.3 | 470.6 | 1294 | |
| 3 | 71.4 | 214.3 | 214.3 | |
| D_j | 424.3 | 979 | 2096.5 | |

| | zonas | | |
|----------------|-------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| O_i (futuro) | 1000 | 2000 | 500 |
| D_j (futuro) | 500 | 1000 | 2000 |

$$T_{ij}^{(2)} = \frac{D_j T_{ij}^{(1)}}{\sum_{K=1}^n T_{kj}^{(1)}} \quad T_{11}^{(2)} = \frac{D_1 T_{11}^{(1)}}{\sum_{K=1}^n T_{k1}^{(1)}} = \frac{500 \times 117.6}{424.3} = 138.6$$

$$T_{21}^{(2)} = \frac{500 \times 235.3}{424.3} = 277.3 \quad T_{31}^{(2)} = \frac{500 \times 71.4}{424.3} = 84.1$$



$T_{ij}^{(2)}$

| zonas | zonas | | | O_i |
|-------|-------|-------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 138.6 | 300.4 | 561.1 | 1000.1 |
| 2 | 277.3 | 480.7 | 1234.4 | 1992.4 |
| 3 | 84.1 | 218.9 | 204.4 | 507.4 |
| D_j | | | | |

| | zonas | | |
|----------------|-------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| O_i (futuro) | 1000 | 2000 | 500 |
| D_j (futuro) | 500 | 1000 | 2000 |

$$T_{ij}^{(3)} = \frac{O_i T_{ij}^{(2)}}{\sum_{K=1}^n T_{ik}^{(2)}} \quad T_{11}^{(3)} = \frac{O_1 T_{11}^{(2)}}{\sum_{K=1}^n T_{1k}^{(2)}} = \frac{1000 \times 138.6}{1000.1} = 138.6$$

$$T_{12}^{(3)} = \frac{1000 \times 300.4}{1000.1} = 300.4 \quad T_{13}^{(3)} = \frac{1000 \times 561.1}{1000.1} = 561$$



$T_{ij}^{(3)}$

| zonas | zonas | | | O_i |
|-------|-------|-----|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 1 | 139 | 300 | 561 | 1000 |
| 2 | 278 | 483 | 1239 | 2000 |
| 3 | 83 | 216 | 201 | 500 |
| D_j | 500 | 999 | 2001 | |

| | zonas | | |
|----------------|-------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| O_i (futuro) | 1000 | 2000 | 500 |
| D_j (futuro) | 500 | 1000 | 2000 |



ELECCIÓN MODAL

Es el proceso en el cual se determina el modo de transporte que eligen los viajeros



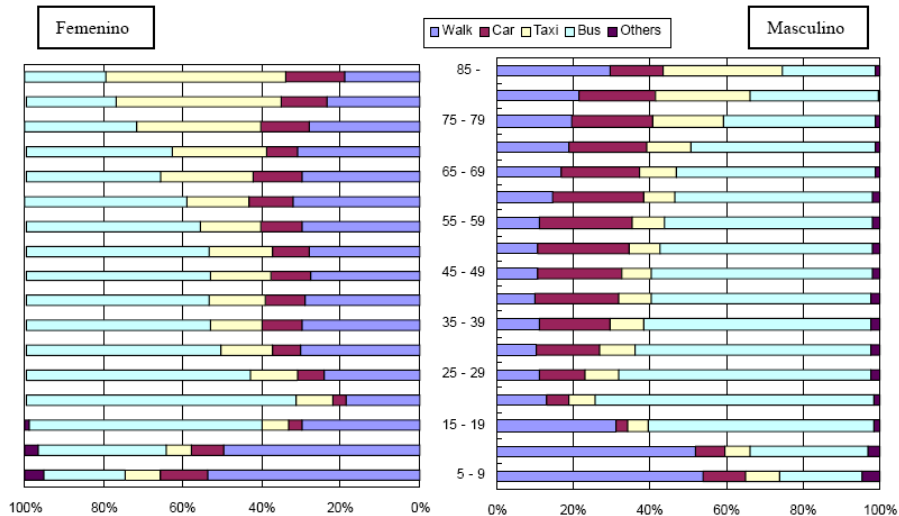


Figura 3.3-13 Participación Modal por Grupo de Edades



FACTORES QUE INFLUYEN

- **Se clasifican en tres grupos:**
 1. **Características del viajero**
 - Disponibilidad de auto
 - Posesión de licencia de conducir
 - Estructura del hogar
 - Encadenamiento de actividades
 - Densidad residencial
 2. **Características del viaje**
 - Propósito del viaje
 - Hora del día
 3. **Características del transporte**
 - Tiempo de viaje
 - Costo monetario
 - Disponibilidad de parqueo y costo
 - Comodidad, seguridad



COSTO GENERALIZADO

- La elección del modo de transporte está en función al costo generalizado

$$Z_{ijk} = \sum a_l X_{ijkl} + \sum b_w U_w + C$$

- Z_{ijk} costo de viajar de i a j por modo k
 X_{ijkl} característica l del modo k entre i y j
 U_w característica socio-económica del viajero
 a_l peso relativo de la característica l
 b_w peso relativo de la característica del viajero
C es un constante



MODELO LOGIT

- La probabilidad de escoger un modo de transporte puede hallarse mediante la función logit

$$P(i) = \frac{e^{-\lambda Z_i}}{\sum_{i=1}^n e^{-\lambda Z_i}}$$

- donde $P(i)$ es la probabilidad de escoger el modo i
 Z_i es el costo generalizado del modo i
 λ es un parámetro que debe ser calibrado en el modelo
n es el número de modos de transporte



EJEMPLO

3 modos

$$\left. \begin{array}{l} Z_1 = \text{S/. } 1.0 \quad \text{Bus} \\ Z_2 = \text{S/. } 4.0 \quad \text{Taxi} \\ Z_3 = \text{S/. } 6.0 \quad \text{Automóvil} \\ \lambda = 0.2 \end{array} \right\}$$

$$e^{-\lambda Z_1} = e^{-0.2 \times 1} = 0.8187$$

$$e^{-\lambda Z_2} = e^{-0.2 \times 4} = 0.4493$$

$$e^{-\lambda Z_3} = e^{-0.2 \times 6} = 0.3012$$

$$1.569$$

$$P(\text{Bus}) = 0.8187/1.569 = 0.52 = 52\%$$

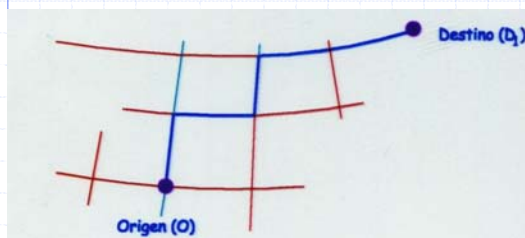
$$P(\text{Taxi}) = 0.4493/1.569 = 0.286 = 28.6\%$$

$$P(\text{Auto}) = 0.3012/1.569 = 0.192 = 19.2\%$$



ASIGNACIÓN Y EQUILIBRIO

- Los viajes se asignan a la red vial buscando el equilibrio



Asignación de rutas para todos los viajes de origen "O" y destino D1 para un modo particular

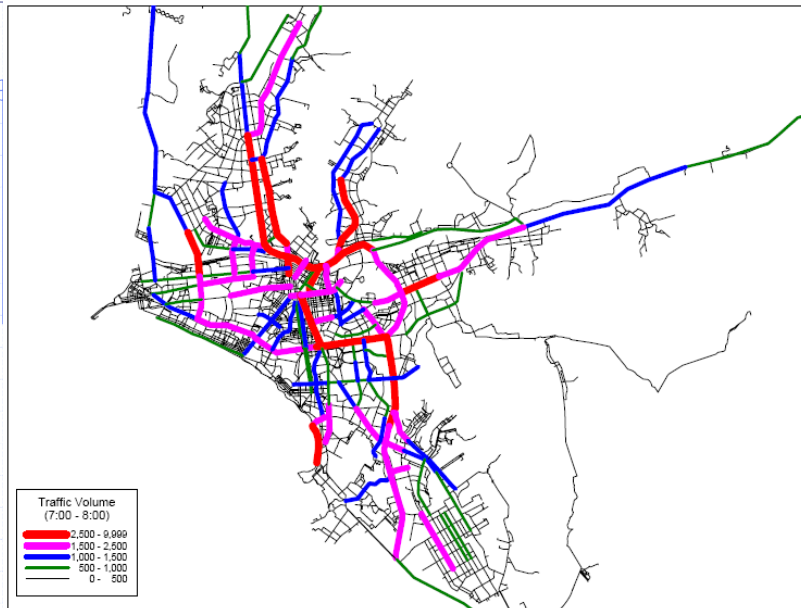


Figura 4.2-13 Volumen de Tránsito en el Período de 7:00 a 8:00



ASIGNACIÓN Y EQUILIBRIO

- El problema principal es determinar que rutas son usadas
- Se asume que cada viajero escoge la ruta que le ofrece el mínimo costo percibido
- Los modelos pueden ser de las siguientes categorías:
 - "Todo o Nada"
 - "Estocástico"
 - "Capacidad restringida"



EQUILIBRIO DEL USUARIO

Primer principio de Wardrop:

“bajo condiciones de equilibrio el tráfico se auto-acomoda en una red congestionada, de tal manera que todas las rutas utilizadas tienen el mismo costo (costo mínimo), mientras que todas las rutas no utilizadas tienen un costo mayor”

- ❑ **Los usuarios buscan el equilibrio pensando en minimizar su costo individual**



EQUILIBRIO SOCIAL

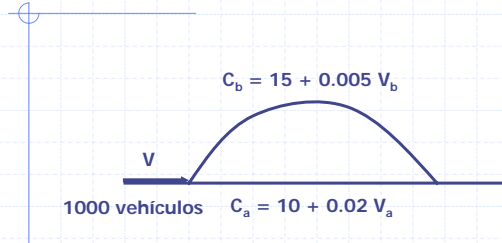
Segundo principio de Wardrop:

“bajo condiciones de equilibrio el tráfico debería acomodarse en una red congestionada, de tal manera que el costo total del sistema sea mínimo”

- ❑ **Se busca el equilibrio social antes que el individual**
- ❑ **Por lo general a los usuarios individuales les interesa su beneficio y no el del sistema**



EQUILIBRIO DE WARDROP



1) Los 1000 por el camino más corto

$$C_a = 10 + 0.02 \times 1000 = 30 \text{ u}$$

$$C_b = 15 + 0.005 \times 0 = 15 \text{ u}$$

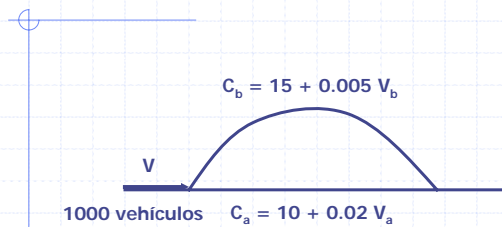
2) Los 1000 por el camino más caro

$$C_a = 10 + 0.02 \times 0 = 10 \text{ u}$$

$$C_b = 15 + 0.005 \times 1000 = 20 \text{ u}$$



EQUILIBRIO DE WARDROP



3) Equilibrio: $C_b = C_a$

$$15 + 0.005 V_b = 10 + 0.02 V_a \quad V_a + V_b = V$$

$$15 + 0.005 (V - V_a) = 10 + 0.02 V_a$$

$$15 + 0.005 V - 0.005 V_a = 10 + 0.02 V_a$$

$$0.025 V_a = 5 + 0.005 V$$

$$V_a = 200 + 0.02 V$$

$$V_b = 0.8 V - 200$$

$$V = 1000 \text{ vehiculos}$$

$$V_a = 400 \text{ vehiculos}$$

$$V_b = 600 \text{ vehiculos}$$

$$C_a = C_b = 18 \text{ u}$$