

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**ANÁLISIS DE LA METODOLOGÍA CLÁSICA DEL MODELO DE
PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE URBANO DESDE EL
ÁMBITO DE LA MOVILIDAD SOSTENIBLE**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

César Oliver Flores Reyna

ASESOR : Ing. Félix Cabrera Vega

Lima, mayo de 2017

RESUMEN DE TESIS

El presente trabajo de tesis evalúa la compatibilidad de los criterios del modelo tradicional de planificación de transporte con aquellos correspondientes a un enfoque de movilidad sostenible. El análisis se realiza a través de tres etapas.

En primer lugar se desarrollan los principios seguidos en el método tradicional de planificación de transporte de cuatro etapas. La primera etapa de generación de viajes, consiste en determinar la cantidad de viajes producidos por zonas en un área de estudio, a partir de ciertos atributos socioeconómicos de la población. La etapa de distribución de viajes, en cambio, determina los flujos de viajes entre zonas, mediante la obtención de una matriz de viajes. Luego, en la etapa de partición modal se obtienen los porcentajes de uso de cada modo de transporte para los flujos de transporte estimados. Finalmente, la etapa de asignación de viajes resuelve la distribución final de los flujos de viajes a través de rutas en la red de transporte.

En segundo lugar, se analizan los criterios del enfoque de movilidad sostenible en relación al modelo tradicional, mediante la comparación de estos criterios con los presupuestos y procedimientos de las cuatro etapas de modelación. En base a ello, se evalúan posibles incompatibilidades en los procesos seguidos en el modelo clásico para cada etapa de modelación. Posteriormente, se describen algunas políticas actuales de transporte que buscan adaptar la metodología clásica a un enfoque sostenible. En ese sentido, se resalta la promoción de los planes de movilidad urbana sostenible (PMUS), los cuales tienen respaldo en muchas ciudades del mundo.

Por último, se describen los principios de modelación que siguieron dos estudios de planificación en la ciudad de Lima: un plan maestro de transporte de Lima, y el estudio de demanda de los corredores complementarios de la ciudad. En base a los criterios empleados en ambos modelos, se pudo demostrar que existen incompatibilidades entre los supuestos del modelo clásico y los criterios de un enfoque sostenible. Si bien la estructura del modelo constituye una herramienta útil para la planificación a largo plazo, esta carece de elementos desagregados que puedan ser empleados. Dada la simplificación de los modelos matemáticos del método clásico, se torna complejo usar data a nivel de individuo, con la cual se analice eficientemente el comportamiento de viajes de bajo consumo energético. No obstante, se resalta el uso reciente de planes basados en un enfoque sostenible, que buscan lograr una adaptación del modelo.

<u>Índice</u>	Página
<u>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 Análisis del problema.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Hipótesis.....	2
1.4 Metodología de trabajo.....	2
<u>CAPÍTULO 2 LA PLANIFICACION DEL TRANSPORTE</u>	4
2.1 El transporte en la ciudad.....	4
2.2 Macrovariables en la planificación del transporte.....	4
2.3 Los sistemas de transporte.....	5
2.4 La modelación del transporte.....	6
<u>CAPÍTULO 3 LA ETAPA CERO: OBTENCIÓN DE DATA</u>	10
3.1 La estadística de muestreo en la modelación.....	10
3.1.1 Métodos de muestreo.....	10
3.1.2 Errores a considerar durante la modelación.....	12
3.2 Métodos de recolección de data.....	14
3.3 Sistemas de zonificación y redes.....	16
3.3.1 Zonificación.....	16
3.3.2 Representación de la red.....	18
<u>CAPÍTULO 4 GENERACIÓN DE VIAJES</u>	21
4.1 Definiciones.....	21
4.2 Análisis Regresional.....	23
4.2.1 Análisis por zonas.....	23
4.2.2 Análisis por hogares.....	24

4.3 Análisis por Categoría.....	25
<u>CAPÍTULO 5 DISTRIBUCIÓN DE VIAJES</u>	27
5.1 Definiciones y principios.....	28
5.1 Método del factor de crecimiento.....	29
5.3 Métodos sintéticos.....	30
5.3.1 Modelo clásico gravitacional.....	30
5.3.2 Modelo de maximización de la entropía.....	33
<u>CAPÍTULO 6 PARTICIÓN MODAL</u>	35
6.1 Modelos de elección discreta.....	35
<u>CAPÍTULO 7 ASIGNACIÓN DE VIAJES</u>	38
7.1 Introducción.....	38
7.2 Metodología de la etapa de asignación.....	40
7.2.1 La elección de ruta.....	41
7.2.2 La construcción de árboles de viajes.....	42
7.3 Modelos de asignación tradicionales.....	43
7.3.1 Modelo todo o nada.....	43
7.3.2 Modelo estocásticos.....	43
7.3.3 Modelo basado en el equilibrio del usuario.....	44
<u>CAPÍTULO 8 LA PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE Y LA SOSTENIBILIDAD</u>	46
8.1 El paradigma de la movilidad sostenible.....	46
8.2 Sostenibilidad en el modelo clásico de cuatro etapas.....	48
8.2.1 Generación de viajes.....	49
8.2.2 Distribución de viajes.....	50
8.2.3 Partición modal.....	50
8.2.4 Asignación de viajes.....	51
8.3 Un nuevo enfoque en la planificación del transporte.....	51

8.3.1 Los planes de movilidad sostenible.....	52
<u>CAPITULO 9 ESTUDIOS DE MODELACIÓN DEL TRANSPORTE EN LIMA</u>	62
9.1 Planificación del transporte público urbano en Lima.....	62
9.2 JICA: Plan Maestro Metropolitano al 2025.....	64
9.2.1 Etapa cero: recolección de data.....	64
9.2.2 Generación de viajes.....	65
9.2.3 Distribución de viajes.....	66
9.2.4 Partición modal.....	67
9.2.5 Asignación de viajes.....	68
9.3 TÁRYET: Diseño operacional de los Corredores Complementarios.....	68
8.3.1 Recolección de data.....	69
8.3.2 Obtención de la matriz de viajes.....	70
8.3.2 Asignación de viajes.....	71
9.4 Alcance de los estudios.....	73
9.4.1 Plan maestro de JICA.....	73
9.4.2 Diseño operacional de TÁRYET.....	75
<u>CAPITULO 10 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS</u>	77
10.1 Conclusiones.....	77
10.2 Comentarios.....	81
<u>REFERENCIAS</u>	83

<u>Índice de Figuras:</u>	Página
Figura 2.1 Modelo clásico de cuatro etapas.....	9
Figura 3.1 Viajes que se realizan en un área de estudio.....	15
Figura 3.2 Sistema de zonificación en el área metropolitana de Lima.....	18
Figura 3.3 Sistema de redes de transporte en un área metropolitana.....	20
Figura 4.1 Viajes generados y atraídos en cada zona de estudio.....	22
Figura 4.2 Producción y atracción de viajes.....	24
Figura 4.3 Relación de linealidad lograda al usar intervalos.....	26
Figura 5.1 Distribución de viajes entre las zonas numeradas y la zona i	29
Figura 5.2 Número de viajes (V_{ij}) según el modelo gravitacional.....	33
Figura 5.3 TLD (trip length distribution) para un área urbana.....	35
Figura 5.4 Estado macro, meso y micro para una distribución de viajes.....	36
Figura 6.1 Alternativas en un modelo de partición modal de elección discreta.....	40
Figura 7.1 Relación flujo-velocidad y flujo-tiempo tradicionales.....	43
Figura 7.2 Ejemplo de árbol de viajes.....	48
Figura 7.3 Ejemplo del algoritmo de Dijkstra.....	48
Figura 7.4 Ejemplo de asignación de viajes según el equilibrio del usuario.....	50
Figura 8.1 Emisiones de CO ₂ por modos de transporte.....	54
Figura 8.2 Diagrama del razonamiento del enfoque tradicional de cuatro etapas.....	55
Figura 8.3 PMUS de Copenhague - Dinamarca.....	59
Figura 8.4 Diagrama del razonamiento del enfoque tradicional de cuatro etapas.....	60
Figura 9.1 Sistemas de transporte masivo en Lima Metropolitana.....	62
Figura 9.2 Desorden y congestión en el sistema tradicional de transporte público.....	63
Figura 9.3 Puntos de conteo en línea cordón en el estudio de JICA.....	65
Figura 9.4 Comparación entre zonas integradas y zonas de muestreo.....	66
Figura 9.5 Comparación de resultados de las etapas de generación y distribución.....	67
Figura 9.6 Los cinco corredores complementarios de Lima.....	69
Figura 9.7 Recolección de datos en puntos de los corredores.....	69
Figura 9.8 Corredor complementario Panamericanas.....	72

Figura 9.9 Escenarios futuros de demanda de viajes en Dresden, Alemania.....	75
Figura 10.1 Diagrama del razonamiento del enfoque de oferta en la planificación.....	79

Índice de Tablas:

Tabla 2.1 Niveles de planificación en el transporte urbano.....	7
Tabla 4.1 Patrón de viajes en el análisis por categoría.....	27
Tabla 5.1 Matriz de viajes T_{ij} para un número de “z” zonas.....	30
Tabla 5.2 Conversión de una matriz base por el método del factor de crecimiento.....	32
Tabla 7.1 Valores típicos de variables en relaciones flujo-velocidad en el Reino Unido..	45
Tabla 7.2 Estructura de un modelo de asignación de viajes.....	47
Tabla 8.1 Recomendación del uso de modelos de transporte en los PMUS.....	61
Tabla 9.1 Partición modal obtenida en la recolección de data.....	68
Tabla 9.2 Resumen de la matriz resultante en el estudio de TÁRYET.....	71
Tabla 9.3 Velocidad de t.público como función de la velocidad de t.privado.....	72
Tabla 9.4 Flujos de viajes en rutas troncales del corredor Panamericanas.....	73
Tabla 9.5 Partición modal estimada al 2020 y 2030 en Lima.....	74

Índice de Ecuaciones:

Ec. 4.1 Ecuación de regresión en el método de análisis de regresión.....	24
Ec. 5.1 Principio base en una matriz de viajes.....	30
Ec. 5.2 Ecuación clásica del costo generalizado del viaje.....	31
Ec. 5.3 Número de viajes (V_{ij}) según el modelo gravitacional.....	33
Ec. 5.4 – 5.7 Desarrollo de la expresión final del modelo gravitacional.....	34
Ec. 5.8 – 5.11 Desarrollo de la expresión final del modelo de máxima entropía.....	37

Ec. 6.1 Ecuación de la utilidad global de un modo de transporte.....	39
Ec. 6.2 – 6.3 Principio de desigualdad en la teoría de utilidad aleatoria.....	39
Ec. 6.4 Ecuación de probabilidad de elección de un modo de transporte.....	39
Ec. 6.5 Ecuación de la utilidad racional de un modo de transporte.....	40
Ec. 6.6 Probabilidad de elegir el modo A dentro de un universo de tres opciones.....	40
Ec. 7.1 Ecuación de la velocidad de circulación para las relaciones flujo-velocidad.....	44
Ec. 7.2 Ecuación de la velocidad de flujo libre en zonas céntricas en Reino Unido.....	44
Ec. 7.3 Ecuación de la velocidad de flujo libre en zonas no céntricas en Reino Unido...	44
Ec. 9.1 Función costo-flujo en el modelo de asignación de viajes de TÁRYET.....	71



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Análisis del problema

La estimación de la demanda de viajes se circunscribe como la primera fase dentro del esquema de planificación del transporte. Esta primera fase se desarrolla a través de un modelo predictivo y metodológico basado en cuatro etapas: la generación de viajes, la distribución, la división de modos y finalmente la asignación de la red. Este procedimiento, cuya estructura se consolidó a finales de la década de 1950 (UC, 2015), es ampliamente aceptado y utilizado por ingenieros y planificadores de transporte en todo el mundo. El objetivo detrás de la modelación es obtener los flujos de viajes realizados en una red a lo largo de una zona de estudio, que en el ámbito de la tesis tendrá el alcance de una ciudad. Algunas particularidades del método clásico de modelación consisten en haber considerado como modos de viaje principales a los vehículos motorizados o de consumo energético no renovable, como por ejemplo son los automóviles, buses o trenes.

Por otra parte, actualmente, se ha popularizado una nueva corriente en relación a la movilidad urbana, cuyo enfoque se basa en la sostenibilidad. Básicamente, esta refiere que en la planificación del transporte se debiera promover y gestionar medios de transporte que faciliten los desplazamientos con un menor impacto ambiental y social (Sanz, 1997). Claros ejemplos de estos medios son el uso de la bicicleta o el desplazamiento a pie, los cuales son propicios cuando las distancias de viaje son cortas. El concepto de sostenibilidad en la movilidad procura, por tanto, que en la planificación se considere como uno de los ejes principales la maximización de los viajes cortos. Esta condición involucra planeamientos no solo exclusivos al transporte sino también de carácter urbanístico.

Algunas condiciones y/o restricciones del modelo de cuatro etapas pueden estar imposibilitando que se emplee, desde la planificación, los criterios de sostenibilidad en diversos aspectos (Herce, 2009). En ese sentido, es oportuno evaluar dentro del sistema de modelación tradicional qué procesos pueden ser mejorados y adaptados a este enfoque. De esta manera, se podría obtener un mejor esquema de planificación y promoción de políticas públicas a favor del transporte urbano acorde con el reciente concepto de movilidad sostenible.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general es contribuir a la literatura que existe acerca de la planificación del transporte mediante el análisis de su metodología clásica, y las limitaciones que presenta con respecto al nuevo enfoque de movilidad sostenible en el ámbito urbano.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto se pueden dividir en tres. En primer lugar, se desarrollará el método clásico de modelación del transporte urbano a lo largo de sus cuatro etapas. En segundo lugar, se analizará la compatibilidad de este modelo tradicional en función de sus limitaciones actuales tanto desde su estructura como desde el nuevo enfoque de la movilidad sostenible. Por último, se describirán y analizarán dos modelos de planificación realizados para la ciudad de Lima, los cuales son un plan maestro de transporte y el estudio de implementación de los corredores complementarios.

1.3 Hipótesis

Como hipótesis principal, se considera que el método clásico de planificación presenta limitaciones que no son compatibles con los actuales criterios de sostenibilidad. Por tanto, se necesitarían evaluar los criterios considerados en los procedimientos de las distintas etapas a fin de encontrar, de ser necesario, variantes que logren adaptar el modelo de planificación en uno guiado por el concepto de la movilidad sostenible.

1.4 Metodología de trabajo

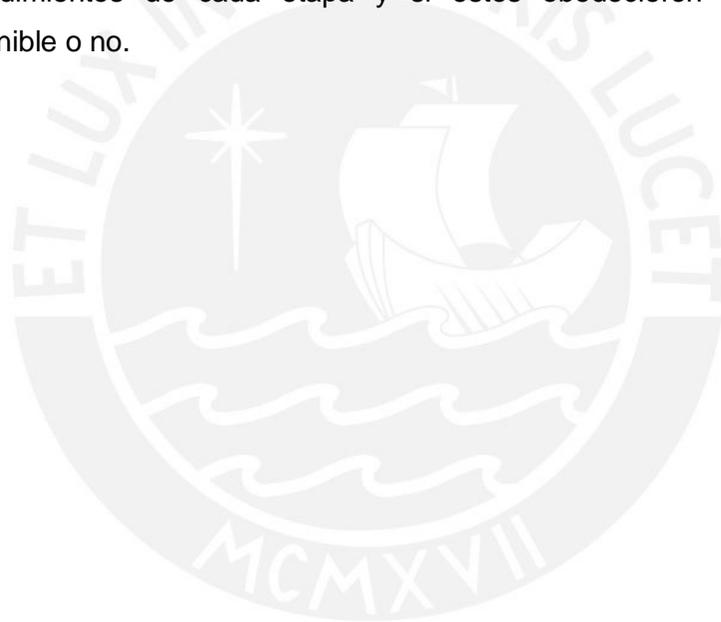
La metodología de trabajo ha sido diseñada tomando en consideración que el proyecto de tesis se enfoca en la revisión de la literatura relacionada a la planificación del transporte. El procedimiento a seguir consistirá en la revisión de fuentes bibliográficas importantes de acuerdo a la temática y los objetivos del proyecto. Posteriormente, corresponderá realizar un análisis de dichas fuentes con el fin de obtener conclusiones que representen información relevante para futuras investigaciones.

En primer lugar, se procederá a la revisión de aquellas fuentes relacionadas al estudio del método clásico de modelación del transporte. Se desarrollará el modelo de cuatro etapas en función de los procedimientos matemáticos efectuados en cada etapa, los

supuestos o criterios considerados y la implicancia que estos tienen en los resultados obtenidos por etapa.

En segundo lugar, se analizará toda fuente concerniente a la inclusión de criterios de movilidad sostenible en el ámbito de la planificación del transporte. Se determinarán qué supuestos y/o criterios en cada etapa de la modelación clásica no se condicen con los criterios de sostenibilidad, así como qué parámetros, si fuese el caso, necesitarían incluirse.

Finalmente, se recogerán y analizarán los modelos de planificación efectuados en dos estudios para la ciudad de Lima. Se compararán ambos modelos en función de su estructura metodológica empleada, las consideraciones o supuestos en los procedimientos de cada etapa y si estos obedecieron a criterios de movilidad sostenible o no.



CAPÍTULO 2 LA PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE

2.1 El transporte en la ciudad :

En la actualidad, poco más de la mitad de la población mundial vive en ciudades y esta cifra sigue en aumento; el Perú no ha sido ajeno a este fenómeno de migración pues al día de hoy cerca del 75% de su población ya es urbana (INEI, 2015). El aumento de población urbana, derivado por un fenómeno globalizador creciente, ha contribuido al desarrollo económico y social de muchos países; sin embargo, ha sido el causante de nuevas problemáticas tales como el saneamiento, la producción alimenticia y el transporte, ámbito en el que se desarrollará esta tesis.

El transporte en la ciudad es un asunto que involucra analizar la movilización de bienes y personas en el área urbana. Así, el punto de partida del largo y complejo proceso de planificación del transporte consiste en identificar cuáles son los factores que condicionan el porqué y el cómo las personas viajan en la ciudad.

2.2 Macrovariables en la planificación del transporte :

Podemos abarcar el tema del transporte de las personas en el ámbito de la ciudad desde dos perspectivas: la demanda y la oferta.

El concepto de demanda de transporte involucra entender aquellos factores que la condicionan. El primero de ellos es plantear que las personas viajan para satisfacer una necesidad, la cual está vinculada con realizar una actividad en un destino determinado (ej. ir al trabajo, ir de compras o regresar a casa). Por tanto, se puede entender que la demanda del transporte es derivada, pues con excepción de la práctica del “*sight-seeing*” o turismo urbano, el fin de cada viaje no es el propio en sí mismo sino aquello que lo motiva (Ortúzar, 2011). Un segundo factor condicionante es que la demanda es cuantitativa y diferenciada; la cantidad de viajes presenta niveles diferentes a lo largo de determinadas horas del día, cada uno con propósitos distintos. Por último, un tercer factor está vinculado a que la demanda de transporte se genera en un espacio determinado; la forma como está estructurado el uso del suelo urbano condicionará de forma determinante la necesidad de movilidad (Herce, 2009).

La segunda perspectiva corresponde al concepto de oferta del transporte. Este concepto es complementario al primero y responde a todo aquello que buscará satisfacer la necesidad de viajes en la ciudad. Una particularidad de los viajes es que

deben ser satisfechos en el momento en el que se los necesita, de manera que la oferta de transporte se debe analizar desde el concepto de un servicio y no como un bien (Ortúzar, 2011). Este servicio de transporte no solo incluye, por ejemplo, el que otorga un sistema de transporte público sino también a la infraestructura en la que se desempeña o la gestión que la opera.

Se pueden sintetizar estas dos perspectivas en tres macrovariables a analizar: el sistema de actividades relacionado con la demanda, el sistema de transporte relacionado con la oferta, y el equilibrio de flujos de viajes, que es el resultado del equilibrio de las dos primeras (UC, 2015). El objetivo más general de la planificación es lograr establecer un sistema de transporte que satisfaga la demanda de transporte dado un sistema de actividades. Para ello, la modelación buscará estimar la demanda real de viajes dado un sistema de actividades y de transporte, para luego diseñar y gestionar un servicio de transporte optimizado. De esta manera, se debe entender que el proceso de planificación es cíclico, pues el sistema de actividades cambia permanentemente, al desarrollarse en un tiempo específico.

2.3 Los sistemas de transporte:

Los sistemas de transporte representan el pilar en el cual se desarrolla, en este caso en particular, la planificación y gestión del transporte urbano. A pesar que tradicionalmente se consideraba que la demanda era solamente afectada por las actividades de las personas, se ha comprobado que los sistemas de transporte también condicionan la demanda de viajes, dado que incluyen el espacio en el cual los viajes se desenvuelven (Herce, 2009). Algunas componentes que contiene un sistema de transporte son la **infraestructura** (ej. vías en la ciudad, paraderos, carriles segregados), los **equipos** (ej. buses, líneas de metro, sistemas de cobro electrónico) y la **operación** (ej. normas de operación, gestión del tránsito, semaforización) (UC, 2015).

La forma como un sistema de transporte condiciona la demanda de viajes es porque está asociado a un costo por utilizarlo, el cual se conoce también como “nivel de servicio”. Este costo eventualmente podría representar un costo monetario (ej. una tarifa, un peaje); sin embargo, hay otros costos vinculantes a la elección de viajar. Uno de ellos es el tiempo, factor que tradicionalmente se ha considerado como el más importante.

Este deseo por minimizar los tiempos de viaje ha guiado diversas políticas de transporte urbano en muchas ciudades. Algunas de ellas han optado por la construcción de mayor infraestructura vial, con el fin de obtener mayor “fluidez vehicular”; otras, en cambio, abordaron un cambio en el transporte público desde la propuesta de una implementación rauda de sistemas de transporte masivo (metro, BRT) por toda la ciudad. Sin embargo, algunos expertos arguyen que enfocar el problema solo desde la perspectiva de la capacidad de los sistemas de transporte es un error, pues no se controla que el número de flujos de viajes siga en aumento, o por otro lado, que ciertos indicadores perniciosos como la congestión o la contaminación, mantengan sus mismos niveles.

En este punto es donde conviene mencionar el reciente concepto de “la sostenibilidad en el transporte”. Satisfacer el equilibrio oferta-demanda no debería ser solamente el único alcance de la planificación. Se ha visto que el flujo de demanda de viajes está condicionado básicamente por un sistema de actividades, el cual es dinámico, y un nivel de servicio o costo asociado a un sistema de transporte en el que estos viajes se desarrollan. Un criterio tradicional relacionado a mejorar el nivel de servicio es aumentar la capacidad de estos sistemas de transporte. Un criterio vinculado a la sostenibilidad, por el contrario, podría buscar intervenir en las actividades que se desarrollen gestionando el uso del suelo a fin de procurar diversos objetivos entre los que están favorecer una partición modal que minimice el consumo energético, así como promover más viajes de corta distancia, en los cuales los modos de emisión cero como la bicicleta o el recorrido a pie sean más propensos a ser los protagonistas. Los criterios relacionados a la sostenibilidad no solo intentan hacer más eficiente el equilibrio entre oferta y demanda sino que también incluyen alcanzar objetivos de mayor protección medioambiental, así como objetivos relacionados al concepto de justicia social, vinculado a la accesibilidad de todos los ciudadanos a la movilidad en la urbe. Los criterios a considerar desde la planificación del transporte, de planteados por el enfoque de movilidad sostenible se profundizarán más adelante.

2.4 La modelación del transporte:

De lo expuesto anteriormente, podemos mencionar que el extenso, complejo y tradicional proceso de planificación del transporte involucra tomar decisiones vinculadas a mejorar el nivel de servicio de un sistema de transporte. No obstante, los nuevos criterios de sostenibilidad pueden servir de eje al proceso, pues apuntan a

presentar variantes más eficientes y, justamente, más sostenibles a largo plazo dentro de las tres perspectivas clásicas: la económica, la social y la medioambiental.

Por otro lado, es necesario reconocer que la toma de decisiones dentro del proceso de planificación está circunscrita a distintos niveles en función del impacto que tendrán en el tiempo, sean estas de corto, mediano o largo plazo (ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Niveles de planificación en el transporte urbano. *Fuente: Adaptado de Ortúzar (2011) y UC (2015)*

Niveles de planificación en el transporte urbano			
Toma de decisión	Impacto	Etapas	Ejemplo
Estratégica	Largo plazo	Modelación de la demanda	Modelo tradicional de cuatro etapas
		Diseño	Diseño de rutas, plan de infraestructura.
Táctica	Mediano plazo	Gestión	Esquema tarifario o de peajes, optimización de rutas.
Operacional	Corto plazo	Operación	Gestión de flota, cambio en horarios.

Según Ortúzar (2011) podemos clasificar la toma de decisiones en la planificación del transporte en tres: estratégica, táctica y operacional, en función de su impacto en el tiempo. Si se busca hacer del proceso de planificación uno más eficiente y sostenible, es necesario analizar aquellas fases cuyos impactos sean grandes, esto es, a largo plazo, pues condicionarán a las fases menores.

La primera de todas ellas es la modelación del transporte. Su objetivo es pronosticar los flujos de demanda de viajes dado un sistema de actividades en una ciudad. Para lograrlo, se ha creado un modelo estructurado, basado en la obtención de una muestra significativa que represente los flujos de viajes en la realidad. A este modelo tradicional

se le suele conocer como el “modelo de cuatro etapas” (ver Figura 2.1) y es ampliamente empleado por planificadores e ingenieros en el mundo. Si bien el modelo no es de carácter determinístico, se ha considerado que presenta una estructura útil en la estimación de la demanda de transporte. El modelo se compone de la siguiente manera:

- **Generación de viajes:**

El objetivo de esta etapa es estimar el número de viajes generados (desde un origen) y atraídos (hacia un destino) por distintas zonas dentro de un área de estudio. Las características socio-económicas o el uso del suelo en estas zonas pueden condicionar los flujos de viajes que se produzcan o atraigan.

- **Distribución de viajes:**

En esta etapa se intenta conocer el número de viajes producido entre distintos pares de zonas. Así, los flujos de viajes son distribuidos en el espacio estudiado entre orígenes y destinos específicos. Este proceso conduce a la aparición de matrices de viajes.

- **Partición modal:**

En esta etapa, importa pronosticar la elección del modo de viaje esperado entre las diversas conexiones halladas en la etapa anterior. Se asignan viajes en matrices por distintos modos (ej. vehículo particular, transporte público, viajes a pie o en bicicleta).

- **Asignación de la red:**

Finalmente, se asignarán los viajes de las matrices obtenidas previamente, por cada modo, a la red existente, obteniéndose la demanda en diversas rutas en corredores específicos.



Fig 2.1 Modelo clásico de cuatro etapas. *Fuente: (UC, 2015)*

Una vez que el modelo ha sido calibrado y validado, será necesario evaluar posibles escenarios futuros que condicionen la planificación de las próximas etapas de menor impacto; considerando estas nuevas consideraciones, se corre el modelo nuevamente (Ortúzar, 2011). El resultado final permite contar con una serie de alternativas entre las que se tendrá que escoger aquella que represente una mejor política de transporte y/o programa de inversiones a realizar.

Sin embargo, previamente a escoger la mejor política de transporte, que en teoría debería ser la más sostenible, es oportuno preguntarse si el modelo que determinó tal o cual nivel de servicio también fue el más sostenible. En los siguientes capítulos, se analizará el modelo de cuatro etapas y su relación con la inclusión de los criterios de movilidad sostenible. Si bien se parte de que el modelo tradicional tiene una estructura útil y funcional, es necesario ahondar más y evaluar si los criterios que poseen sus etapas internas son compatibles con las de un enfoque sostenible, y en caso de no serlo, qué necesitan para adaptarse a él o qué otros parámetros sería necesario incluir.

CAPÍTULO 3 LA ETAPA CERO: OBTENCIÓN DE DATA

En este capítulo se desarrollará el procedimiento para la recolección de información o data así como la preparación de un esquema espacial de análisis; ambos componen la primera etapa, o etapa cero, previa al inicio del proceso de modelación de cuatro etapas. La data inicial está relacionada, por un lado, con el estudio que busca representar el comportamiento de las personas que viajan en la ciudad, y por otro lado, con el espacio físico, esto es, el área de estudio, asociado al proceso de modelación.

3.1 La estadística en la modelación del transporte:

La estadística es una herramienta que nos permite ordenar datos medidos como también inferir otros, difícilmente medibles, dado un nivel de incertidumbre. Esto último es muy importante en el proceso de toma de decisiones en la planificación del transporte, pues los datos que son necesarios están vinculados con el estudio de la dinámica de los viajes en el espacio urbano, tarea que es compleja. El procedimiento clásico consiste en delimitar una muestra dentro de una población definida en el estudio. Luego, será necesario hacer observaciones a los atributos de dicha muestra e inferir, mediante herramientas estadísticas, la forma como cambian estos parámetros con el fin de tomar una decisión apropiada. Este mecanismo de acción será necesario en todas las etapas de modelación bajo ciertas condiciones que serán detalladas cuando se desarrolle cada etapa por separado.

Según Ortúzar (2011), en el proceso de seleccionar la muestra apropiada a estudiar, se presentan dos dificultades: que esta sea lo suficientemente representativa y que bajo el supuesto que este objetivo sea logrado, cómo se pueden extraer conclusiones válidas de dicha muestra. El primer objetivo puede alcanzarse eligiendo un buen método de muestreo acorde con las condiciones del motivo de estudio. La segunda dificultad, en cambio, puede ser resuelta más fácilmente identificando los errores presentes en el proceso de análisis a fin de evitarlos o minimizarlos.

3.1.1 Métodos de muestreo:

Previamente a mencionar los métodos de muestreo y sus implicancias, es importante tener en claro el concepto de muestra en el ámbito de la modelación del transporte urbano. Según Ortúzar(2011), una muestra es *“una colección de unidades especialmente seleccionadas que buscan representar una población cuyos parámetros*

son de nuestro interés". Las unidades de la muestra no necesariamente son los individuos (personas) de la población de estudio; muchas veces, estos son agrupados para disminuir la complejidad del estudio. Por ejemplo, en la etapa de generación de viajes, se requiere información sobre los atributos de la población tales como el ingreso, la edad u ocupación; tradicionalmente, esta información no es procesada por cada individuo, sino a través de una unidad más grande como es el hogar. Son tres los aspectos a considerar en la obtención de la muestra a fin de asegurar que sea representativa.

En primer lugar, importa la forma como son seleccionadas las unidades de la muestra, esto es, los tipos de muestreo. Luego, es necesario identificar la clase de población a representar y por último, el tamaño de la muestra. Los tres aspectos están relacionados entre sí y dirigen el procedimiento a seguir para elegir la muestra óptima y su posterior análisis en el resto de etapas.

A continuación, se presentan los **tipos de muestreo** más usados en la modelación del transporte urbano (Ortúzar, 2011):

- **Muestreo simple** (*simple random*): es el método más general de muestreo, además de ser la base de los dos muestreos siguientes. Consiste en elegir muestras de igual tamaño al azar dentro de una población.
- **Muestreo estratificado** (*stratified random*): en este caso, primero se divide la población en estratos homogéneos de acuerdo a una variable de interés (ej. salario, edad) para luego realizar el muestreo simple por estrato. Este modelo permite obtener estratos con una mejor proporción de grupos de población de interés.
- **Muestreo basado en la elección** (*choice-based random*): este último tipo de muestreo es un sub-tipo del anterior. Muchas veces será necesario estratificar la población en base a un proceso de elección (ej. modo de transporte, ruta elegida). Este tipo de muestreo es útil bajo ciertas condiciones, aunque es necesario advertir que sus resultados pueden no respetar el orden estocástico de una buena muestra, aumentando el riesgo de error.

A continuación, es importante tener en consideración la **clase de población** que se busca representar con una muestra. De manera general, se podría decir que la

población de interés son todos los habitantes de una ciudad; sin embargo, es posible que bajo ciertas consideraciones durante el proceso de modelación, esta población se vea limitada (Herce, 2009). Por ejemplo, en la modelación clásica, no es práctico incluir dentro de la población de interés a personas con movilidad reducida (ej. ancianos, personas en silla de ruedas o con discapacidad visual), dado que los viajes que estos generan son menores en comparación con el resto. El concepto de movilidad sostenible discute esta omisión y otras, no solo en la etapa de obtención de data sino también en las cuatro tradicionales, las cuales serán mencionadas en el Capítulo 8.

Por último, y como reto mayor para confiar en la representatividad de la muestra a estudiar, se debe determinar cuál es su tamaño adecuado. Según Ortúzar(2011) si bien no hay una forma del todo objetiva de determinar el **tamaño de muestra** óptimo, hay tres factores que la condicionan: la variabilidad de los parámetros, el nivel de precisión requerido al medir cada uno de ellos, y el tamaño de la población. Los dos primeros son los más importantes a tomar en cuenta; el tamaño de la población, en cambio, no representa un problema, ya que siempre es grande (ej. habitantes de una ciudad).

El teorema del límite central es el soporte estadístico fundamental en la solución del problema de establecer un tamaño adecuado de la muestra. Según este teorema, la media de una muestra tiende a mostrar una distribución normal conforme el tamaño de la muestra (n) aumenta, reduciendo así la variabilidad del parámetro medible.

Además, el nivel de precisión a elegir, el cual refleja el nivel de confianza de la muestra, dependerá de la importancia que se asigne a cada parámetro evaluado. Esto lleva a la reflexión sobre la necesidad de una muestra grande para garantizar una correcta distribución a fin de establecer varianzas y niveles de confianza aceptables. Sin embargo, el tamaño de la muestra se tiene que ajustar con otro factor como es el costo del estudio, tanto en términos económico como de tiempo de realización, el cual puede limitado dado el presupuesto que las entidades de planificación asignen a esta etapa de recolección.

3.1.2 Errores a considerar durante la modelación:

En esta sección, se identificarán los errores que se generan durante la recolección de data, la cual será usada posteriormente en las distintas etapas de modelación del transporte. Al inicio del capítulo, se advirtió de la necesidad de contar con una muestra

lo suficientemente representativa de la población a estudiar. Logrado este objetivo, es oportuno evaluar su confiabilidad, a fin de obtener conclusiones válidas, dado que los valores obtenidos afectarán los resultados de las etapas siguientes. Durante la etapa inicial de muestreo se pueden identificar dos tipos de errores (Ortúzar,2011):

- **Error de muestra:** es el error que surge producto del proceso de azar durante el método de muestreo. Disminuye al aumentar el tamaño de la muestra y no suele afectar al promedio de los parámetros sino a su variabilidad.

- **Error parcializado:** es el error ocasionado por un mal criterio al seleccionar las variables de acuerdo al motivo de estudio (ej. una etapa de modelación). Cuando se cometen este tipo de errores, los resultados obtenidos y la confiabilidad del muestreo son afectados directamente, de manera que debe evitarse.

Los errores de muestra son los únicos que se pueden considerar permisibles, pues su ocurrencia está vinculada con el tamaño de muestra considerado, el cual por motivos de practicidad no es lo suficientemente grande; así, por cuestiones de costo y tiempo de estudio no es posible eliminarlos, pero sí minimizarlos. Existen otras clases de error que puede aparecer durante las etapas de modelación y que son menos permisibles (ej. asumir tendencias futuras en valores de ciertas variables). Entre estos errores, los más significativos son los siguientes:

- ✓ **Error de medida:** son los errores que surgen durante la medida de data necesaria para el inicio de la modelación. Por ejemplo, se puede incurrir en error en las medidas de los enlaces de la red de transporte, en el llenado de las encuestas origen-destino, en la percepción de tiempo de viaje de las personas.

- ✓ **Error de especificación:** son errores producto de la simplificación, a veces necesaria, del modelo en alguna etapa. Por ejemplo, se puede omitir una variable importante, añadir otras innecesarias o considerar usar una función lineal para representar efectos no lineales (ej. relaciones costo-flujo en la asignación de viajes).

- ✓ **Error de transferencia:** es un error a nivel agregado que ocurre cuando se utiliza un modelo de un estudio pasado (ej. ecuaciones, parámetros) en un contexto diferente (tiempo, lugar). Aunque se pueden hacer ajustes al modelo que compensen la transferencia, el error permanece, pues la dinámica de los

viajes de las personas varía según el contexto. El error puede incrementarse aún si se transfieren datos en ciudades donde hay poca planificación territorial y de infraestructura.

✓ **Error de agregación:** Este tipo de error es uno de los más comunes en el paradigma clásico de modelación, debido a la naturaleza agregada del modelo en sí. Dado que es necesario obtener resultados promedio de viajes en una red, se emplean parámetros promedios en las etapas de modelación (ej. ratios de viajes por hogar, tiempos de viaje promedio). En ese sentido, los modelos obvian información a nivel del individuo, que pueden modificar los resultados finales. Asimismo, incluso en etapas donde se usa data desagregada, como los atributos de los viajeros en la estimación de la partición modal, se incurren en errores de agregación, pues los resultados a nivel individual tendrán que ser agregados para ser usados en el modelo final, generando en el proceso cálculos que subestiman o sobreestiman la situación observada en campo.

Se ha visto la importancia que tiene un buen proceso de muestreo a fin de obtener una muestra que represente en el mejor escenario posible a los habitantes de una ciudad y sus características. Además es necesario poner atención en los errores que pueden cometerse en esta etapa y las que siguen en la modelación para poder minimizarlos y obtener resultados más confiables. Corresponde a la autoridad competente analizar la disyuntiva entre costo del estudio y la complejidad o precisión del modelo, dado que de esta última dependen los errores en los que se pueden incurrir.

Desde la perspectiva de la movilidad sostenible, la complejidad del modelo estará sujeta a la inclusión de nuevos parámetros como modos de transporte amigables con el medio ambiente (ej. bicicletas) o categorías de población más inclusivas (ej. personas con movilidad reducida, niños) entre otros que se analizarán en el capítulo 8.

3.2 Métodos de recolección de datos:

En esta sección, se mencionan los principales métodos de recolección de datos que componen las muestras a procesar en la modelación de cuatro etapas. Los datos que se necesitarán recolectar estarán vinculados a todo aquello que afecte la dinámica de los viajes en un área metropolitana. De acuerdo con las características y alcance territorial de la ciudad, se delimitará primero un área de estudio. Luego, esta área se dividirá en zonas y se establecerá una red que represente el espacio donde se realizan

los viajes; estos dos procedimientos en particular se analizarán con más detalle en la siguiente sección.

El área de estudio presenta ciertos elementos como el borde del área (llamado también cordón externo) y líneas internas intermedias (o líneas cortina) que son líneas cuyo paso puede ser restringido (ej. rieles de ferrocarril, ríos).

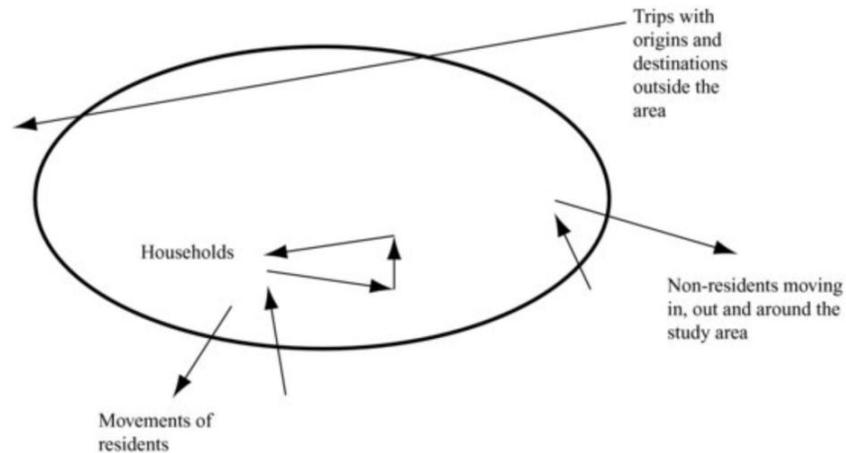


Fig 3.1 Viajes que se realizan en un área de estudio. *Fuente: (Ortúzar, 2011)*

En ese sentido, se entiende que los viajes se desarrollan de formas diversas en un área metropolitana, como ocurre en la ciudad de Lima. Por ejemplo, de la Figura 3.1, se observa que la mayoría de viajes son producidos por residentes y no residentes – usualmente por un periodo corto - al interior del área. Algunos viajes tan solo atraviesan el área de estudio (ej. viajes interprovinciales) y otros salen e ingresan a ella con frecuencia (ej. viajes a playas del sur de Lima). Por tanto, es necesario recurrir a métodos de recolección de datos cuyos resultados otorguen información lo más variada y completa posible, dada la complejidad del desarrollo de los viajes. Según Ortúzar (2011), la información básica requerida previa al inicio de las cuatro etapas de modelación se resume a continuación:

- **Encuestas a hogares:** Interesa conocer los viajes producidos por los residentes del área de estudio (ej. miembros de cada hogar), tanto dentro del área como ingresando o saliendo de ella. Las encuestas a hogares deberán incluir información socio-económica de sus integrantes como el ingreso, edad,

tamaño del hogar e incluso la tenencia de vehículo particular. La información obtenida de estas encuestas representa la mayor fuente de información empleada en la modelación de las etapas de generación y de distribución de viajes.

- **Encuestas de interceptación:** Se puede obtener información de encuestas en las que se intercepta a personas (usualmente no residentes) que cruzan el cordón externo del área o alguna línea cortina (ej. río Rímac en Lima). Los datos obtenidos de este tipo de encuesta ocasionalmente pueden servir de apoyo a las encuestas a hogares al ampliar la base de datos de viajes generados o atraídos al área. Por otro lado, también pueden servir de herramienta de calibración de los modelos de distribución, pues ayudan a restringir los flujos de viajes en puntos de borde del área de estudio.

- **Encuestas de tiempo de viaje:** La información obtenida de este tipo de encuestas es usualmente usada para calibrar y validar modelos de asignación de viajes. Asimismo, es importante prestar especial atención al desarrollo de estas encuestas, pues se pueden generar errores, debido a una percepción del tiempo poco confiable de las personas.

- **Data adicional:** Es importante contar con información complementaria a las encuestas, que será usada en las distintas etapas de modelación. Con el apoyo de algunas encuestas e información estatal, se puede saber sobre el uso del suelo en el área de estudio (ej. densidad de hogares, zonificación municipal, áreas de estacionamiento), la infraestructura de la ciudad (ej. redes de transporte público actuales, intercambios viales, normas de tránsito). Incluso es conveniente obtener información acerca de la idiosincrasia de las personas en relación, por ejemplo, de la preferencia de ciertos modos o formas de viaje (ej. encuestas de preferencia declarada).

Por último, hay ciertos elementos que deben guiar el proceso de cada encuesta a fin de obtener información de calidad, tanto confiable como precisa. Stopher y Jones (2001) recomiendan algunas consideraciones al momento de planificar el esquema de una encuesta. Entre ellas están incluir a todos los modos de transporte hábiles (incluyendo no motorizados), obtener información de todos los habitantes por hogar (se incluye a niños, ancianos), obtener los propósitos de viaje al mayor nivel de detalle

posible y cubrir en la encuesta la mayor porción de tiempo de viajes (ej. 24 horas, 7 días de la semana). Se identifica que algunos de los elementos a considerar están en concordancia con la perspectiva de la movilidad sostenible. En ese sentido, se entiende que si busca modelar el transporte urbano bajo un enfoque de sostenibilidad, todas las etapas, aun la de obtención de data, debería incluir este mismo enfoque.

3.3 Sistemas de zonificación y redes:

Como se menciona al final de la sección 3.1, se requiere hacer un análisis de la disyuntiva entre el nivel de precisión del estudio y su costo. De acuerdo al nivel de precisión escogido, se procederá a planificar un esquema del área de estudio en cuestión, tanto a nivel de las zonas dentro del área como al de la red de transporte que se va a modelar. Además, este nivel de precisión deberá ser lo suficientemente apropiado a fin de hacer menos complejo el proceso de modelación a lo largo de sus cuatro etapas. A continuación, se desarrollan las consideraciones a tomar en el proceso de zonificación y el establecimiento de una red de transporte.

3.3.1 Zonificación:

La importancia de contar con un buen sistema de zonificación surge de la necesidad por hallar un método para agrupar adecuadamente a los hogares, cuyos atributos serán luego obtenidos en las encuestas y procesados en la modelación de cuatro etapas. De acuerdo con Ortúzar (2011), al momento de establecer un sistema de zonificación del área de estudio, se tendrán que tomar en cuenta dos aspectos: el número de zonas y el tamaño que estas deben tener. A continuación se menciona el procedimiento clásico de zonificación de un área urbana (ver Figura 3.2).



Fig 3.2 Zonificación en el área metropolitana de Lima compuesta de 427 zonas. *Fuente: (JICA, 2012)*

En primer lugar, se debe delimitar el área de estudio. Para ello, es necesario observar la naturaleza de los viajes de interés en el área: viajes ocupacionales (ej. viajes de trabajo, estudio), opcionales (ej. viajes de recreación), de larga o corta distancia. Otro aspecto es buscar que casi la totalidad de viajes se desarrollen dentro del área de estudio; no obstante, en casos donde las áreas urbanas son pequeñas (ej. ciudades satélites) esto no es posible, debido a que hay más tendencia de flujos entrando y saliendo del área urbana. Por último es importante que el área de estudio siempre sea más grande que el área donde ocurre la mayoría de viajes (ej. el área metropolitana), con el fin de prever una futura extensión urbana.

Una vez identificado el área de estudio, se necesita analizar la región externa a esta. Esta región se divide en un número de “zonas externas”. La cantidad de estas zonas dependerá básicamente de las direcciones (o cuencas naturales) de los viajes que llegan al área. Asimismo, el tamaño que tengan las zonas externas se puede estimar en función del impacto que tienen los viajes que llegan al área de estudio (si son viajes cortos o largos).

Por último, se dividirá el área de estudio en “zonas internas”. Por un lado, se puede definir el tamaño de las zonas en función de las necesidades de cada etapa de modelación o según el propósito del estudio. En las dos primeras etapas (generación y distribución de viajes) se pueden establecer zonas más grandes, debido a que se requiere información con un nivel de agregación alto (ej. atributos como el ingreso familiar, tamaño del hogar) en comparación con las etapas de partición modal y asignación. Por otro lado, las zonas agrupan los atributos y propiedades que poseen (ej. producción de viajes) en un punto imaginario llamado “centroide de la zona”. Estos puntos se unen a la red mediante “conectores centroidales”, los cuales representan el costo (en unidades de tiempo o dinero) de trasladarse del centroide al punto más cercano de la red.

Adicionalmente, es importante mencionar las principales consideraciones que se deben tener al zonificar un área de estudio. El cumplimiento de los siguientes aspectos condicionará los resultados que luego se procesarán en las etapas de modelación, especialmente en las dos primeras por su implicancia en el análisis de la cantidad de viajes generados y atraídos en cada zona.

De acuerdo con Ortúzar (2011), la primera consideración es diseñar zonas lo más homogéneas posibles tanto en relación a la composición de personas como al uso del suelo. Por ejemplo, sectores con una desviación estándar alta en los niveles de ingreso no deberían ser agrupados aun si son poblaciones pequeñas. La siguiente consideración está vinculada al límite de las zonas. En ciertos casos, los límites coinciden con líneas cortina usadas en la recolección de data (ej. puentes en ríos, carreteras), lo que puede ocasionar que no se contabilicen estos viajes en la modelación, pues no pertenecen a una zona específica. Por último, hay que considerar un tamaño apropiado para cada zona. Como regla general, se considera que el tamaño sigue una relación inversa con los tiempos de viaje promedio. Así, en áreas congestionadas, es prudente delimitar un mayor número de zonas.

3.3.2 Representación de la red:

En este apartado, se desarrolla la metodología empleada para representar la red de transporte en el cual se realizan los flujos de viajes. Las redes son un componente clave en de la oferta de todo sistema de transporte, pues representa la infraestructura empleada para satisfacer la movilidad de las personas. Las redes se pueden

representar, al igual que las zonas, a distintos niveles de agregación, según sea conveniente. Según Ortúzar (2011), en el modelo clásico de transporte, se utiliza un esquema conocido como “gráfica definida”. Este se basa en un sistema de nodos unidos a través de enlaces o arcos, los que se caracterizan mediante atributos (ej. distancia, número de carriles, velocidad de flujo). Como se mencionó en la sección anterior, un subgrupo de los nodos son los centroides de cada zona, los que se unen a la red mediante enlaces conocidos como conectores centroidales. En la Figura 3.3 se muestra un sistema de red de transporte a nivel de caminos.

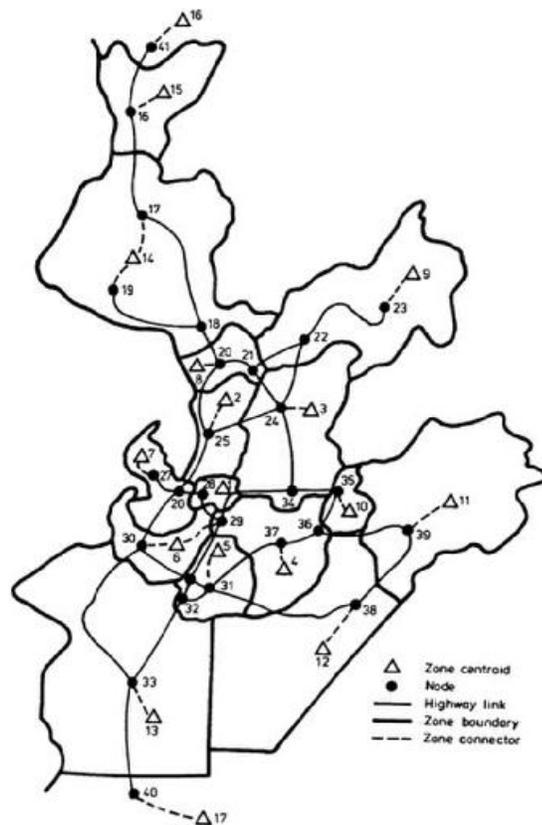


Fig 3.3 Sistema de redes de transporte en un área metropolitana. *Fuente: (Ortúzar, 2011)*

De la imagen, se observan las zonas delimitadas en el área urbana, donde los triángulos representan los centroides de zona, los que se unen a red de enlaces en un punto o nodo numerado, mediante los conectores centroidales (línea punteada). Por otro lado, al igual que en el proceso de zonificación, es necesario tener en cuenta ciertas consideraciones en cuanto a los nodos y enlaces, cuando se construyen las redes de transporte.

En primer lugar, es importante identificar algunos problemas que pueden surgir en la colocación de los nodos. Uno de ellos es que los enlaces se pueden unir a los nodos “sin costo”. Esto refiere a la posibilidad de giro en la red real, la cual puede no ser posible o tiene restricciones (ej. pasos a desnivel, normas de tránsito que prohíben el giro), de manera que es necesario asignar a estos giros cierta penalidad en el modelo. Una forma de corregir este error es aumentar la longitud del enlace antes de llegar al nodo. Otro problema surge cuando el nivel de detalle de la red es alto, lo que aumenta considerablemente el número de nodos y enlaces. Para evitar incurrir en errores de agregación, tal como demostraron Jansen y Bovy (1982) en una investigación, se recomienda incluir solo vías principales (como máximo hasta su tercer nivel de jerarquía). Por ejemplo, en Lima Metropolitana, una red adecuada podría considerar solo vías expresas, metropolitanas y arteriales (IPDU, 2007).

Otro tipo de consideraciones está vinculado con las propiedades que deben caracterizar los enlaces. Como mínimo, Ortúzar (2011) recomienda obtener las longitudes físicas de los enlaces, la velocidad de viaje promedio (a flujo libre y a flujo observado), y la capacidad de las vías medido en *pcu* (unidad de pasajeros-auto equivalentes por hora). En el Capítulo 7, de asignación de viajes, se analizarán otras propiedades en los enlaces, vinculados a funciones de costo asociados a estos, los que influirán en las elecciones de ruta. Algunos ejemplos de estas propiedades son los peajes, el estado físico de la vía o la señalización.

Por último, es conveniente mencionar ciertos aspectos especiales a tomar en cuenta en la representación de la red cuando se modela el transporte público. En este caso, la estructura de la red se ajusta a los servicios que se evalúan ofrecer (ej. rutas de buses, estaciones). Por ejemplo, los conectores centroidales representarán los accesos a los nodos (paraderos, estaciones); además, la red deberá representar todo el sistema de transporte público, de manera que se requerirá de un mayor alcance en las vías a modelar (más vías secundarias). Adicionalmente, se puede aprovechar la nueva estructura de la red para evaluar servicios fuera de la red principal de enlaces; así, la información de los viajes que ocurren en conectores centroidales pueden servir para implementar sistemas de bicicleta pública, cuya función es acercar a las personas a las paradas de bus o estaciones de metro (nodos de la red).

CAPÍTULO 4 GENERACIÓN DE VIAJES:

La generación de viajes constituye la primera de las cuatro etapas del esquema tradicional de modelación del transporte. Su objetivo es predecir el número de viajes generados (O_i) y atraídos (D_j) en cada una de las zonas que componen un área de estudio (Figura 4.1).

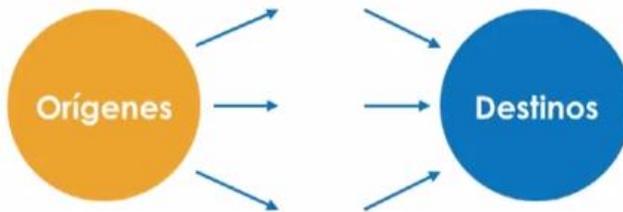


Fig 4.1 Viajes generados y atraídos en cada zona de estudio *Fuente: (UC, 2015)*

De acuerdo con Ortúzar (2011), existen dos maneras de obtener la cantidad de viajes originados y atraídos por zona. Una de ellas es medir las frecuencia de viaje de cada persona, segregando por propósito en las zonas de estudio (ej. ir de compras, al trabajo); este método empírico es conveniente si se quiere estudiar los motivos de viaje. El otro método – que se considera como el clásico y que se desarrolla en este capítulo - está basado en estimar los viajes generados por individuo u hogar en cada zona de estudio, en base a información sobre ciertos atributos de estos individuos y/o sus hogares.

4.1 Definiciones:

En primer lugar, para pronosticar los viajes generados o atraídos en cada zona, es necesario conocer la naturaleza de los mismos. En el modelo clásico de generación de viajes, se diferencian dos tipos de viaje según su punto de partida o llegada: los viajes HB (*home based*), y los viajes NHB (*non home based*). Los viajes HB, según sus siglas en inglés, son aquellos viajes donde el hogar puede ser tanto el origen o el destino del viaje. Los viajes NHB, en cambio, son aquellos donde el hogar no es ni el origen ni el destino del viaje. Por ejemplo, un viaje HB puede ser uno que va de la casa al centro de trabajo, mientras que uno NHB, del centro de trabajo a un centro comercial. En el enfoque clásico, se asume que la proporción de viajes HB es mucho mayor a los de tipo NHB, aunque este hecho ha cambiado considerablemente en las últimas décadas.

Actualmente, cada vez más personas laboran en sus hogares u otras realizan viajes de corta estancia en diferentes puntos al realizar sus labores, lo que se conoce como viajes tipo “tour”.

En base al sistema de actividades de las personas, se identifican las siguientes características de los viajes:

- **Los viajes tienen un propósito:** Se han identificado dos tipos: viajes HB y NHB. En la modelación clásica, a los viajes HB se les puede clasificar en obligatorios (ej. de la casa al trabajo) o discrecionales (ej. de la casa al parque municipal). Los viajes NHB se agrupan en una sola categoría (ej. viajes por negocios o de carácter social).
- **Los viajes se distribuyen por periodos del día:** La mayor concentración de flujo de viajes ocurre en las llamadas “horas pico” (temprano en la mañana y en la noche). Al resto de horas del día se les conoce como “horas valle”. Ciertamente, esta dualidad ha dejado de ser convencional en muchas ciudades, en las que la demanda de viajes se distribuye con más uniformidad a lo largo del día, aunque es cierto que se observan picos en las horas tradicionales de mayor flujo.
- **Los viajes varían según el tipo de persona:** En la modelación de generación de viajes, interesa conocer sobre ciertos atributos socio-económicos de las personas tales como el nivel de ingreso, el tamaño y estructura del hogar, e incluso la tenencia o no del automóvil.

Por último, es necesario hacer una distinción entre los viajes que se analizan por zona, los que pueden ser viajes producidos o atraídos. Los viajes producidos son aquellos que parten del origen de un viaje NHB y son también el origen-destino de un viaje HB. Los viajes atraídos son aquellos que llegan al destino de un viaje NHB y son también el origen-destino de un lugar que no sea el hogar (Figura 4.2). Esta definición permite establecer los parámetros que condicionan la producción y atracción de viajes. Se considera que la producción de viajes está condicionada por los atributos socio-económicos de los individuos u hogares a evaluar. La atracción de viajes, en cambio, sería afectada básicamente por la empleabilidad de la zona o la zonificación municipal establecida (ej. ubicación de centros comerciales).

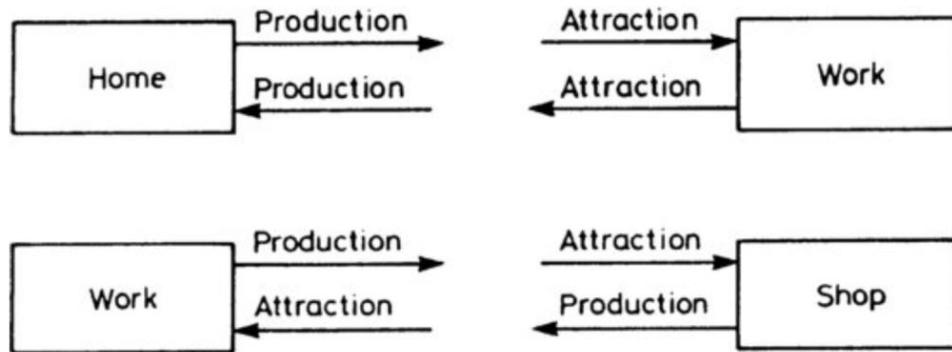


Fig 4.2 Producción y atracción de viajes. *Fuente:* (Ortúzar, 2011)

A continuación, se presentan los dos modelos tradicionales de generación de viajes.

4.2 Análisis de regresión:

Este método consiste en estimar el número de viajes generados en una zona en función de las características socio-económicas de la población, usando una recta de regresión lineal. La variable dependiente (el output) será el número de viajes generados por zona, y los atributos, las variables independientes o explicativas (el input). Se presenta el esquema de ecuación de regresión en el modelo clásico de generación de viajes (UC, 2015) (Ec. 4.1):

$$y_i = \theta_0 + \theta_1 * X_{i1} + \theta_2 * X_{i2} + \dots + \theta_k * X_{ki} + e_i \quad (4.1)$$

De 4.1, se tiene que Y_i representa el número de viajes generados por la zona "i". Además, los valores de "Xi" representan los atributos o parámetros condicionantes en cada zona (ej. tamaño del hogar, ingreso familiar), mientras que "θ" son los pesos relativos dados por el modelador a cada atributo. Finalmente, se incluye una constante de aleatoriedad "e", así como una constante "θ₀" que representa el intercepto de la línea de regresión con el eje Y.

Existen dos perspectivas en relación al nivel de agregación conveniente al momento de emplear las ecuaciones de regresión lineal: a nivel de zona o de hogares.

4.2.1 Regresión basada en las zonas:

En este caso, el número de viajes generados y atraídos es obtenido por cada zona como un conjunto; así, este resultado identificará a cada zona con una producción de viajes en particular. De esta manera, la variabilidad a evaluar será inter-zonal. Al

analizar la cantidad de viajes por zona, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones a fin de que este método sea confiable.

En primer lugar, se debería procurar que la variabilidad entre zonas refleje la variabilidad real de los viajes que se generan, lo cual demanda que las zonas sean lo más homogéneas posibles. Para lograr esto, se tendrían que considerar zonas más grandes a fin de reducir la variabilidad entre ellas. De acuerdo con Ortúzar (2011), el problema se eleva a un nivel muy agregado, en el cual se está ignorando que el principal factor que afecta la decisión de viaje está a un nivel individual.

Por otro lado, se debe prestar atención al tamaño del intercepto. Lo ideal es que pase por el origen, ya que representa que no se producen viajes, si por ejemplo, el tamaño del hogar es cero. Cuando esto no sucede, se debe inferir que la ecuación es inadecuada, pues la incertidumbre estaría explicando parte importante de la producción de viajes (UC, 2015). Además, se debe evitar incluir “zonas nulas” en el modelo de regresión lineal, pues aumentan el tamaño del intercepto; así por ejemplo, zonas industriales, donde casi no se producen viajes HB, se pueden excluir del análisis (Ortúzar, 2011).

4.2.2 Regresión basada en los hogares:

En este caso, se analiza el número de viajes generados y atraídos en las zonas pero empleando la ecuación de regresión por tipo de hogar, para luego agruparlos en cada zona establecida. Esta consideración permite medir y controlar la variabilidad de las viajes por hogares que se van a evaluar, reduciendo así el error de agregación generado en el análisis por zona.

Como consideración, se debe evaluar la relación de linealidad entre los parámetros que se están escogiendo por hogar y los viajes que generan. Cuando esta relación no es lineal a lo largo de todo el eje, se deben buscar maneras de transformar dichas variables en lineales o usarlas por intervalos (ver Figura 4.3). Por ejemplo, la tenencia de tres vehículos en un hogar no representa necesariamente el triple de viajes que en uno donde solo se posee un vehículo; a veces, puede ser menor. Por ello, en muchos estudios se considera establecer categorías de 0, 1 y de más de 2 vehículos por hogar, de manera que la linealidad de la variable sea optimizada (Ortúzar, 2011).

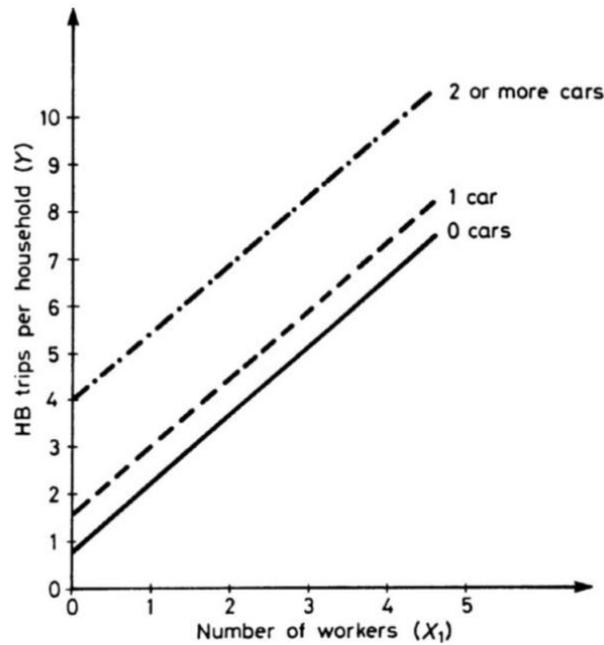


Fig 4.3 Relación de linealidad lograda al usar intervalos. Fuente: (Ortúzar, 2011)

4.3 Análisis por categoría:

Este método consiste en estimar el número de viajes generados por hogar también en función de ciertos atributos particulares, aunque sin la necesidad de una ecuación lineal como en el caso anterior. El modelo tradicional inicia con la clasificación de los hogares de la zona de estudio por categorías, según características que se asumen son las que más condicionan el número de viajes generados tales como el ingreso familiar, el tamaño del hogar, e incluso la disponibilidad del automóvil. Se utiliza la información procedente de las encuestas de hogares – expuestas en el capítulo 3 – con el fin de generar de modo empírico un ratio o patrón de viajes producto del cruce de atributos obtenidos de los hogares (ver Tabla 4.1). Es necesario aclarar que los ratios obtenidos son diferentes según el motivo de viaje estudiado: si son al trabajo o al centro de estudios o si son producto de una movilidad obligada u opcional.

Tabla 4.1. Ejemplo de patrón de viajes en el análisis por categoría.
Fuente: Adaptado de UC (2015)

PATRÓN DE VIAJES/HOGAR/ DÍA SEGÚN EL ANÁLISIS POR CATEGORÍA			
CATEGORÍA		INGRESO MENSUAL	
TAMAÑO DEL HOGAR		Alto	Bajo
	1 ó 2 integrantes	5	6
	más de 2	12	8

A continuación, solo queda estimar el número futuro de hogares que hay para cada categoría – en la tabla de ejemplo hay cuatro categorías – en el año proyectado, y con los ratios previamente hallados, estimar los viajes generados por hogares en una determinada zona de estudio. Algunos autores, como Ortúzar, hacen mención de las limitaciones a tomar al seguir esta metodología en la etapa de generación de viajes, si se buscan obtener resultados confiables.

En primer lugar, se debe procurar definir los rangos de las categorías (ej. en la tabla, qué valor discrimina el ingreso bajo del alto), de manera que la desviación estándar entre los tipos de hogares sea mínima. Esto se puede lograr reduciendo las zonas de estudio o incrementando el tamaño de la muestra en la etapa de recolección de data, aunque esto implica elevar el costo total del estudio de demanda, al igual que en la regresión por zonas. Ortúzar (2011) menciona que, en base a la experiencia de planificadores en este método, se necesitan por lo menos 50 hogares por celda en cada categoría; aun así, valores como estos son solo el resultado de un proceso de ensayo y error en diversos estudios, lo que resulta poco confiable.

En segundo lugar, se debe observar el procedimiento de la estimación de hogares futuros en el plazo proyectado del estudio. Hace unas décadas, Wilson (1974) propuso un modelo probabilístico con este fin. En este modelo, una vez que la data es recolectada y calibrada, se ajusta a distribuciones de probabilidad en base a tres variables: el ingreso familiar, la estructura del hogar y la tenencia o no de vehículo. Así, logra obtener el número de hogares por categoría como resultado de una función de probabilidad teniendo como dato el número total de hogares en la zona. El modelo se puede aplicar al año base, y luego con los parámetros hallados, estimar el número de hogares futuros.

Nuevamente, es necesario resaltar que no existe un método determinístico para definir las mejores variables al definir las categorías, debido a la complejidad de la población estudiada, y que la efectividad de cada método dependerá de la posibilidad de estratificar más a la población de hogares, y por tanto, de incrementar la muestra a usar. Por otro lado, se debe considerar que la zonificación, definida previamente, condicionará los valores de los ratios de viaje. Si por cuestiones de costo, se definen zonas muy grandes y heterogéneas, los valores de los ratios de viajes serán valores promedio, lo cual restará validez al número de viajes generados por zona.



CAPÍTULO 5 DISTRIBUCIÓN DE VIAJES

La distribución de viajes constituye la segunda etapa del esquema clásico de cuatro etapas en el modelo de planificación del transporte. En la etapa anterior, los datos resultantes fueron la cantidad de viajes generados y atraídos por cada zona; sin embargo, esto no permite conocer la interacción que existe entre cada una de ellas. Así, el objetivo en esta etapa será pronosticar los futuros patrones de viajes que ocurren desde una determinada zona a cualquier otra dentro un área de estudio proyectado (ver Figura 5.1).

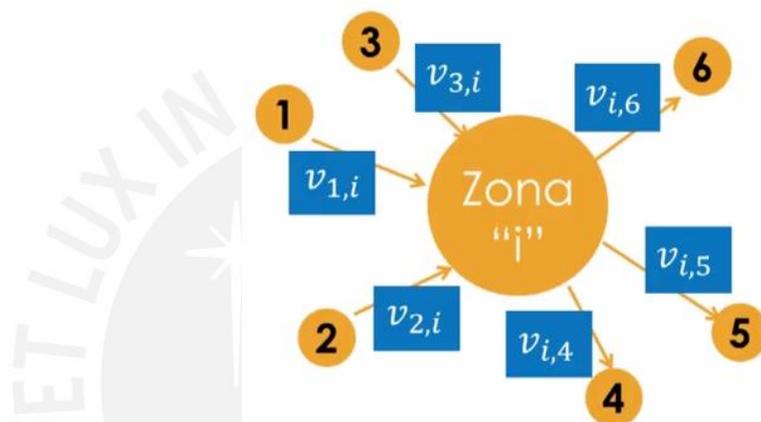


Fig 5.1 Distribución de viajes entre las zonas numeradas y la zona i . Fuente: (UC, 2015)

La mejor manera de representar el patrón de viajes que ocurren entre zonas es creando una **matriz de viajes** (ver Tabla 5.1). Esta matriz, conocida también como matriz OD (origen-destino), es de dos dimensiones y contiene en cada celda el número de viajes que ocurren entre un par determinado de zonas; aquellas celdas que vinculan al mismo par de zonas contienen a los viajes intra-zonales y se ubican en la diagonal de la matriz. De acuerdo a Ortúzar(2011), las matrices pueden usarse a diferentes niveles de agregación, siendo la matriz de nivel agregado la más utilizada en un estudio para una ciudad. Sin embargo, también existen matrices de viajes para estudios o contextos particulares en la modelación, las cuales deben ser desagregadas; así, pueden construirse matrices según el tipo de persona (de acuerdo a ciertos atributos como en la etapa anterior), así como según el propósito o la actividad a realizar al finalizar el viaje (ej. estudio de viajes tipo tour). En suma, la obtención de la matriz de viajes OD es el objetivo fundamental en esta etapa, ya que sus resultados condicionarán el resultado de la etapa de asignación, en la que se asignan los volúmenes de viajes en rutas determinadas.

Tabla 5.1 Matriz de viajes T_{ij} para un número de “z” zonas. Fuente: (Ortúzar, 2011)

Origins	Destinations					$\sum_i T_{ij}$
	1	2	3	...j	...z	
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}	... T_{1j}	... T_{1z}	O_1
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}	... T_{2j}	... T_{2z}	O_2
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}	... T_{3j}	... T_{3z}	O_3
⋮						
i	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	... T_{ij}	... T_{iz}	O_i
⋮						
Z	T_{z1}	T_{z2}	T_{z3}	... T_{zj}	... T_{zZ}	O_z
$\sum_i T_{ij}$	D_1	D_2	D_3	... D_j	... D_z	$\sum_{ij} T_{ij} = T$

5.1 Definiciones y principios

Para toda matriz de viajes, se debe comprobar un principio base, que es el fundamento del modelo de distribución de viajes y sus submodelos. Al sumar todos los valores de celda en cada columna (D_1, D_2, \dots , etc) se obtiene el total de viajes atraídos por dicha zona, así para la primera columna, el valor D_1 representa el total de viajes atraídos por la zona 1. Paralelamente, el valor O_1 será la suma de valores de la primera fila y representará los viajes generados por la zona 1. Estas condiciones se pueden expresar matemáticamente para cualquier par de zonas “i” y “j” de una matriz T_{ij} en el siguiente principio (Ec. 5.1):

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

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

Ec. 5.1 Principio base en una matriz de viajes (Ortúzar, 2011)

Este principio permite validar los valores obtenidos en las celdas, pues los resultados O_i y D_i para cualquier zona i son conocidos de la etapa de generación de viajes. Si se tiene información solo sobre los viajes O_i o D_i para cualquier zona i , se considerará que el modelo de distribución es restringido de forma simple, y si ya se conocen ambos valores, será restringido doble.

Por otro lado, es necesario definir los parámetros que determinan el costo de realizar un viaje. Como se mencionó en el capítulo 3, el flujo de viajes (demanda) está condicionado principalmente por el sistema de actividades de las personas, el cual es dinámico, y el costo asociado al sistema de transporte en el que se desarrollen estos viajes. En el modelo clásico de planificación, particularmente desde la distribución de viajes, los modelos incluyen en sus ecuaciones un factor o elemento de costo, pues este es determinante tanto en el número resultante de viajes que se desarrollan, el modo en el que estos se realizan, y también en la ruta que toman. Usualmente, los componentes del factor de costo deben ser aquellos que generen utilidad negativa, es decir, que desincentiven la realización de los viajes; así los componentes de costo pueden ser monetarios o no (ej. distancia, tiempo). Tradicionalmente, se ha construido una ecuación lineal, conocida como ecuación del costo generalizado del viaje la cual se muestra a continuación (Ec. 5.2).

$$C_{ij} = a_1 * t_{ij}^V + a_2 * t_{ij}^C + a_3 * t_{ij}^I + a_4 * F_{ij} + \delta \quad (5.2)$$

En esta ecuación, los valores de “ t_{ij} ” representan al factor del tiempo. En la Ec. 5.2 se muestran ejemplos de factores de tiempo t_{ij} , como el tiempo de viaje en el vehículo de transporte (t_{ij}^V), así como tiempos adicionales en caminata (t_{ij}^C), o en el intercambio de modo (t_{ij}^I), como ocurre para el transporte público. El valor de F_{ij} representa el costo monetario del viaje (ej. tarifa de transporte público, precio del combustible, peajes), mientras que δ representa un factor independiente de percepción sobre las condiciones del viaje en sí, como la seguridad o el confort, que pueden ser decisivos al momento de elegir viajar o escoger entre modos o rutas. Finalmente, los coeficientes “ a ” representan el peso que el modelador considere apropiado para cada factor.

El valor final de C_{ij} se puede medir en unidades de tiempo o de dinero. De acuerdo a Ortúzar (2011), si se elige lo segundo, los coeficiente “ a ” representarán el valor monetario del tiempo (a_4 sería la unidad), cuyo cálculo es muy subjetivo, pues este varía para cada persona. Por ello, usualmente el costo se expresa en unidades de tiempo (ej. minutos, horas)

A continuación, se desarrollan dos métodos tradicionales empleados para construir un modelo de distribución de viajes.

5.2 Método del factor de crecimiento

El método del factor de crecimiento se emplea para generar una matriz de viajes futura, a partir de una antigua o actual matriz usando un factor de crecimiento estimado. La matriz a modificar puede obtenerse del último estudio de demanda realizado o construirse empíricamente con la información que se tiene de la etapa de recolección de data. Si se tiene data confiable sobre los ratios de crecimiento de viajes en el área de estudio, entonces puede emplearse este método para actualizar la matriz considerando el año de diseño del proyecto (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Conversión de una matriz de restricción simple a viajes origen a una nueva matriz proyectada. *Fuente: (Ortúzar, 2011)*

	1	2	3	4	\sum_j								
1	5	50	100	200	355	→	1	5	50	100	200	355	400
2	50	5	100	300	455		2	50	5	100	300	455	460
3	50	100	5	100	255		3	50	100	5	100	255	400
4	100	200	250	20	570		4	100	200	250	20	570	702
\sum_i	205	355	455	620	1635		\sum_i	205	355	455	620	1635	1962

La principal desventaja de este método es lapso de proyección que transcurre desde la estimación de la nueva matriz hasta el escenario real futuro. Se ha mencionado en anteriores capítulos que el sistema de actividades de las personas es dinámico y, por tanto, poco estable en el tiempo. Así, si por ejemplo se estimara una nueva matriz de viajes a 10 años con el método del factor de crecimiento, el resultado sería poco confiable, considerando que en ese tiempo se pudieron haber cambiado los patrones de zonificación, creado nuevos centros comerciales o construido cientos de edificios de vivienda. Según Ortúzar (2011), este método puede ser útil para obtener una matriz referencia previamente a la planificación de las actuaciones a realizar desde un marco estratégico para el ámbito urbano.

5.3 Métodos sintéticos

El método del factor de crecimiento sirve para generar una nueva matriz a partir de una un factor constante, con lo cual se asume que el patrón de viajes de los individuos permanece estable. Los métodos sintéticos, en cambio, prescinden de ratios establecidos y establecen un modelo predictivo propio acerca de la interacción de viajes que se generarán entre las zonas de estudio. A continuación, se presentan dos

de los modelos sintéticos más conocidos: el modelo gravitacional y el de la maximización de la entropía.

5.3.1 Modelo clásico gravitacional

Este método genera la nueva matriz de viajes mediante una expresión basada en la ley gravitacional de Isaac Newton, la cual declara que la fuerza de atracción entre dos cuerpos es directamente proporcional al producto de sus masas e indirectamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Análogamente, durante la década de 1950, Casey (1955) creó un modelo tal que la cantidad de viajes que ocurren entre un par de zonas i y j está determinada por los viajes que se generan en i y son atraídos por j , así como inversamente relacionados según la distancia que los separa (ver Figura 5.2 y Ec. 5.3). El concepto de distancia física entre zonas se ha dejado en desuso para dar paso a un concepto de desutilidad o desincentivo de realizar los viajes entre zonas, el cual se vincula con el costo generalizado de viaje (C_{ij}).

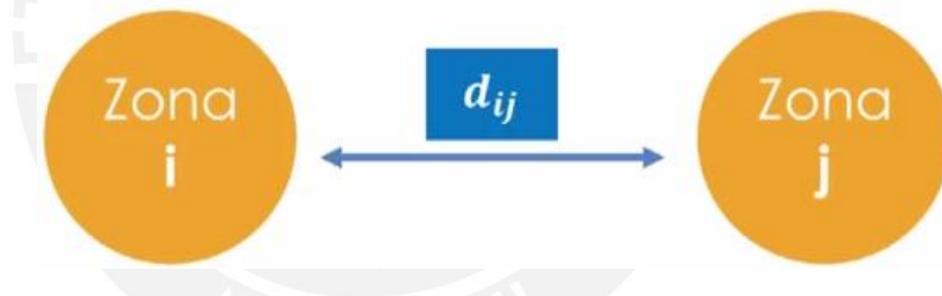


Fig 5.2 Modelo de distribución de viajes basado en la Ley de gravitación de Newton. Fuente: (UC, 2015)

$$V_{ij} = K * \frac{O_i * D_j}{d_{ij}^n} \quad (5.3)$$

De la expresión (5.3), V_{ij} es valor incluido en cada celda de la matriz T_{ij} . Luego, O_i y D_j representan los viajes generados en una zona i y atraídos a una zona j respectivamente. Además, el valor de “ K ” representa una constante de proporcionalidad, mientras que “ n ” es un parámetro de calibración del modelo. El costo generalizado C_{ij} puede reemplazar a d_{ij}^n en la ecuación si se convierte este parámetro

en una función decreciente o de disuasión f_{cij} , la cual contiene un parámetro de calibración β , como se muestra (Ec. 5.4 y Ec. 5.5):

$$V_{ij} = T_{ij} = K * O_i * D_j * f_{cij} \quad (5.4)$$

$$f_{cij} = \exp(-\beta C_{ij}) \quad (5.5)$$

A continuación, al evaluar el principio base de la matriz de la Ec. 5.1, y considerando que la matriz es restringida doble (caso más general), es necesario usar factores de balanceo A_i y B_j , los que, siguiendo el método iterativo de Furness, cumplirán con el principio base (Ec. 5.6). Así, la expresión final del modelo gravitacional se reduce:

$$T_{ij} = A_i * O_i * B_j * D_j * f_{cij} \quad (5.6)$$

Simplificando

$$T_{ij} = a_i * b_j * f_{cij} \quad (5.7)$$

La expresión de la Ec. 5.7 refleja que la nueva matriz de viajes (T_{ij}) para el año de diseño proyectado está condicionada en dos aspectos. Por un lado, por la iteración resultante de los valores de viajes O_i y D_j , simplificados en a_i y b_j y por el otro, por el costo generalizado del viaje expresado en una función decreciente f_{cij} .

Finalmente, es importante resaltar que la función disuasiva f_{cij} contiene un parámetro de calibración β . Durante la etapa de calibración del modelo de distribución, este valor se debe ajustar hasta que los resultados del modelo puedan representar con proximidad a la distribución de tiempo de viajes (TLD en inglés) del área urbana, la cual es medida en el año base. Como se recuerda, es conveniente que el valor de C_{ij} esté en unidades de tiempo (ver Figura 5.3).

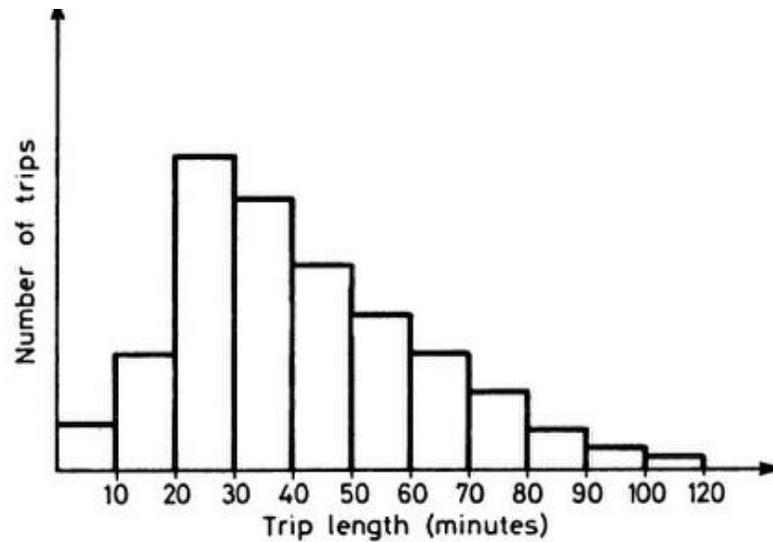


Fig 5.3 TLD (trip length distribution) para un área urbana. *Fuente: (Ortúzar, 2011)*

5.3.2 Modelo de maximización de la entropía

La maximización de la entropía es un modelo que busca optimizar los resultados obtenidos por el modelo gravitacional, bajo el concepto de máxima probabilidad u ocurrencia. En primer lugar, se considera que se pueden establecer tres niveles de agregación o también llamados “estados” dentro de una matriz de viajes. El estado más general corresponde al estado “macro”, en el cual solo se visualizan los viajes generados y atraídos por zona. Luego, le sigue el estado “meso” que involucra a los viajes que ocurren entre un par de zonas, esto es, los valores de celdas dentro de la matriz. Por último, el nivel más desagregado corresponde al estado “micro”, en el cual se registran los viajes de cada persona, independientemente de la zona de origen o destino. Estos tres niveles no se excluyen entre sí; así, por ejemplo, un estado macro puede estar asociado con dos estados meso posibles, y uno de ellos a su vez con seis estados micro posibles (ver Figura 5.4). Del ejemplo mostrado, según el modelo, la matriz de viajes a considerar en el estudio sería aquella con el segundo estado meso (#2), pues tiene la mayor probabilidad de ocurrencia.

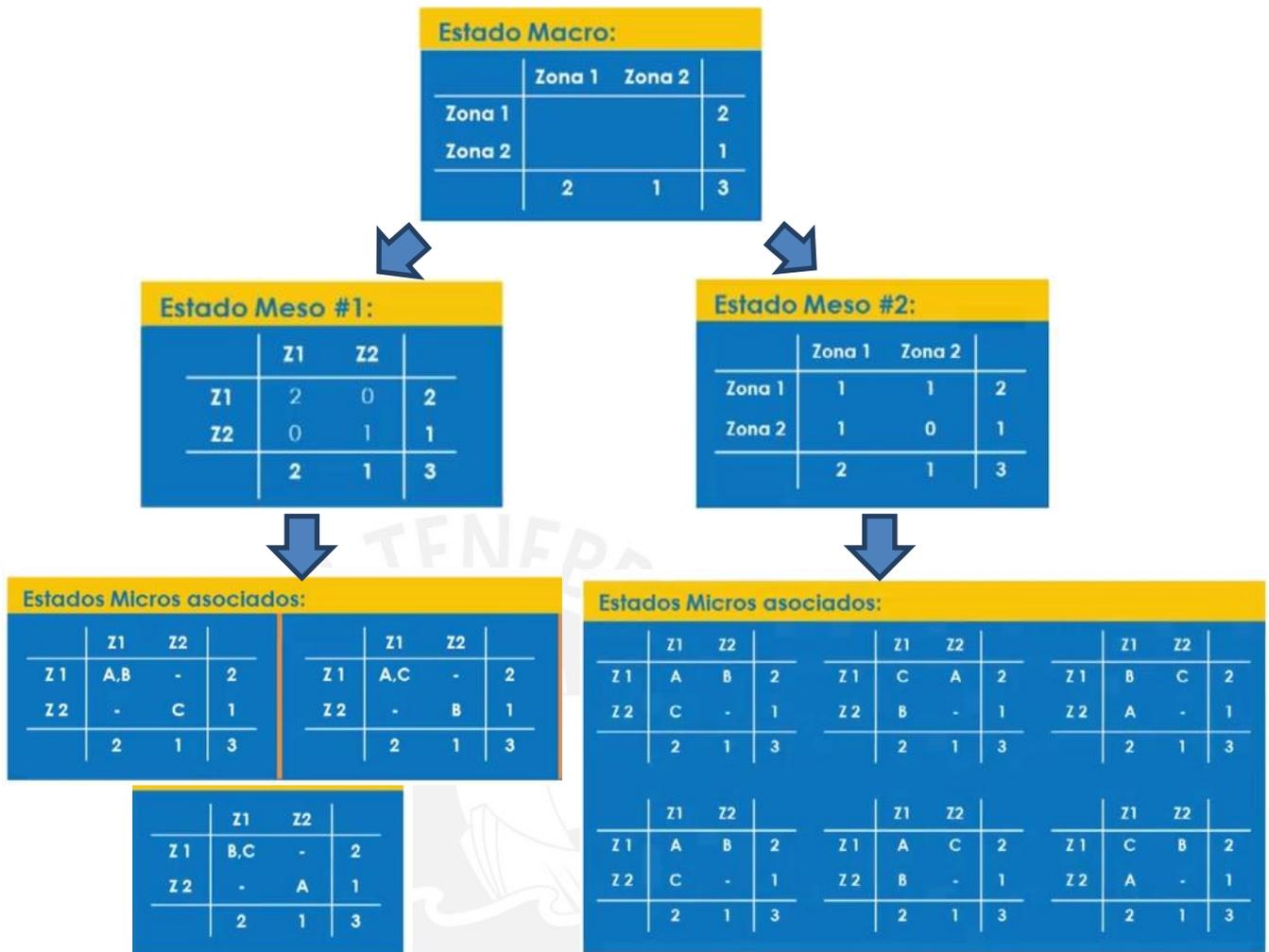


Fig 5.4 Estado macro, meso y micro de un modelo de distribución de viajes.
Fuente: Adaptado de UC (2015)

El concepto base de este modelo es que cada estado micro asociado a un estado meso tiene la misma probabilidad de ocurrencia. Esta asunción permite deducir que la matriz más probable es aquella que contiene la mayor cantidad de estados micro. En ese sentido, la entropía se define como la cantidad de estados micros asociados a un estado meso. La maximización de esta entropía permitirá encontrar, según este modelo, la verdadera matriz, que es aquella que se empleará en las siguientes etapas de modelación. Wilson (1970) profundizó el concepto de la entropía y la formuló en una expresión matemática ($W(T_{ij})$) para toda matriz T_{ij} (estado meso) con un número W de estados micro asociados (Ec. 5.8):

$$W(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \quad (5.8)$$

A continuación, se puede maximizar el valor de $W(T_{ij})$ mediante la maximización de su función logaritmo $\log W'$, la cual se simplifica en la siguiente expresión, conocida también como función de entropía (Ec. 5.9):

$$\log W' = - \sum_{ij} (T_{ij} \log T_{ij} - T_{ij}) \quad (5.9)$$

Para generar la nueva matriz, se debe mantener el principio de convergencia de Ec. 6.1 y emplear una función decreciente de costo (f_{cij}). Considerando estas nuevas restricciones, se emplean multiplicadores de Lagrange (α' , α'') para obtener la máxima entropía (L):

$$L = \log W' + \sum_i \alpha'_i \left\{ O_i - \sum_j T_{ij} \right\} + \sum_j \alpha''_j \left\{ D_j - \sum_i T_{ij} \right\} + \beta \left\{ C - \sum_{ij} T_{ij} c_{ij} \right\} \quad (5.10)$$

Finalmente, derivando 5.10 e igualando a cero, se pueden agrupar las variables relacionadas al número de los viajes totales origen-destino (O_i y D_j) con factores de balanceo (A_i y B_j), quedando la nueva matriz T_{ij} como sigue (Ec. 5.11):

$$T_{ij} = A_i * O_i * B_j * D_j * f_{cij} \quad (5.11)$$

Si bien esta ecuación es muy parecida a la obtenida del modelo gravitacional, esta nueva expresión tiene ahora dos variables de restricción: las variables α (vistas en Ec. 5.10), incluidas en $A_i * O_i$ y $B_j * D_j$, que garantizan el principio de maximización de la entropía y la función de costo decreciente f_{cij} , con su factor de calibración β , que es el principal factor que condiciona la distribución de viajes. De esta manera, se puede verificar que el concepto de la máxima entropía actúa solo como agente optimizador de la clásica ecuación gravitacional del modelo de distribución de viajes.

CAPÍTULO 6 PARTICIÓN MODAL

La etapa de partición modal constituye la tercera etapa dentro del esquema tradicional de cuatro etapas en la planificación del transporte. El objetivo principal de los modelos de partición modal es poder estimar de manera confiable la proporción del uso de modos de transporte en todos los viajes. A diferencia de las dos etapas anteriores donde se obtienen resultados según ciertas condiciones a un nivel de agregación alto como los hogares o las zonas, en la elección del modo, los atributos individuales de los viajeros toman un rol protagónico. Por ello, los modelos actuales de partición modal buscan ser lo suficientemente sensibles a aquellas condiciones que determinan las decisiones individuales; así, el enfoque actual apunta al uso de modelos desagregados.

6.1 El modelo de elección discreta

Los modelos de elección discreta se llaman así, pues buscan representar el comportamiento de elección de un individuo en base a un número de opciones disponibles. En el contexto de la modelación de la partición modal, se entiende que la elección se basará en elegir un modo de transporte en particular para los distintos tipos de viajes a realizar; por ejemplo, el modo de viaje al trabajo en días laborables (UC, 2015). El paradigma clásico de los modelos de elección discreta postula que la probabilidad de un individuo de elegir una opción está en función de sus características socioeconómicas y la atracción relativa de cada una (Ortúzar, 2011). Esta llamada atracción relativa se puede representar bajo el concepto de utilidad, el cual puede incluir varios componentes; así, surge la teoría de la utilidad aleatoria, la cual plantea que el modo elegido será aquel que mayor utilidad genere a la persona.

Sin embargo, la utilidad no se puede calcular de forma determinística, pues existe un factor de subjetividad en la percepción de utilidad de cada individuo. La teoría de utilidad considera la existencia de dos componentes: uno estimado por el modelador y otro aleatorio. La existencia de este último componente genera que los resultados finales sobre la proporción del uso de los modos se representen en funciones de probabilidad y no de valor definido.

Adicionalmente, según UC (2015), la teoría de utilidad aleatoria asume tres supuestos sobre el comportamiento de los individuos. En primer lugar, que el individuo toma decisiones racionales, además, que este dispone de varias alternativas y todas están

disponibles, y por último que cada alternativa genera una utilidad de acuerdo a los atributos que se asocie a cada modo (ej. costo, eficiencia, rapidez).

A continuación, se presenta la ecuación de la utilidad generada al elegir un modo de transporte en particular para un individuo (Ec. 6.1), donde U_{iq} es la utilidad global para el individuo, V_{iq} , la utilidad medida por el modelador y ε_{iq} el componente aleatorio de la utilidad, generado a partir de las preferencias personales de cada persona.

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq} \quad (6.1)$$

En el enfoque tradicional de modelación del transporte, la partición modal ha considerado solo la elección entre el vehículo privado y el transporte público. Así, por ejemplo, alguien elegirá tomar el metro antes que manejar si la primera opción le genera mayor utilidad. En Ec. 6.2, se elige el modo “i” si su utilidad es mayor a cualquier modo “j”.

$$U_{iq} \geq U_{jq} \quad (6.2)$$

$$V_{iq} + \varepsilon_{iq} \geq V_{jq} + \varepsilon_{jq} \rightarrow \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq} \geq V_{jq} - V_{iq} \quad (6.3)$$

Desarrollando 6.2, se obtiene la desigualdad en Ec. 6.3, la cual es uno de los principios del modelo que se debe verificar: que la diferencia de dos componentes aleatorias sea mayor a la diferencia de utilidades entre dos opciones. Como es imposible tener certeza sobre esta desigualdad, se recurre al concepto de probabilidad para estimar la proporción del modo elegido.

Según la distribución que presente la diferencia de los residuos aleatorios “($\varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq}$)”, se pueden generar modelos matemáticos distintos. El modelo clásico más usado por su simplicidad asume que la diferencia de residuos ε presenta una distribución tipo Gumbel. En este caso, el modelo que gobierna la ecuación de probabilidad se conoce como Modelo Logit Multinomial (MNL), el cual plantea que la probabilidad (P_{iq}) de elegir la opción “i” se expresa de la siguiente manera (Ec. 6.4):

$$P_{iq} = \frac{\exp(\lambda * V_{iq})}{\sum_j \exp(\lambda * V_{iq})} \quad (6.4)$$

En Ec. 6.4, el factor λ es de escala, y su función es regular el comportamiento de la variable de utilidad (V_{iq}) en la ecuación de probabilidad; generalmente, está

relacionado a la desviación estándar de la distribución Gumbel. En la práctica, este factor se suele normalizar a 1, ya que no es posible determinar su valor exacto (UC,2015). En caso λ fuese casi cero, la proporción tiende a ser más equilibrada o equiprobable, mientras que si tiende a infinito, se genera una situación de “todo o nada”, esto es, la opción con más utilidad será elegida por todos, lo que no ocurre en la realidad.

De 6.4, es visible que se necesita hallar la variable V_{iq} , que representa la porción del valor de la utilidad racional. El enfoque tradicional plantea una ecuación lineal parecida a la de regresión lineal en la etapa de generación de viajes (Ec. 6.5):

$$V_{iq} = \sum_r \theta_r * X_{irq} + \sum_r \theta_r * Z_{irq} \quad (6.5)$$

En esta ecuación, la utilidad medible V_{iq} se expresa en términos de los atributos del modo “ r ”, expresados como X_{irq} (ej. tarifa de transporte, costo de combustible, velocidad asociada). También, influye en la utilidad medible características particulares de cada individuo (ej. tenencia de vehículo, edad), representadas por Z_{irq} . Finalmente, los coeficientes θ indican el peso relativo que tiene cada variable, el cual es estimado por el modelador durante la fase de calibración.

Como ejemplo práctico, se puede considerar que para la elección de viaje para un modo de un viaje intra-zonal de 3km, se dispone de tres alternativas: el auto, la bicicleta o el ir a pie. Si consideramos como únicos parámetros válidos los atributos de cada modo (X_{irq}) como el tiempo y el costo de viaje, se pueden obtener las utilidades del auto (V_A), la bicicleta (V_B) y el viaje a pie (V_C) por separado, cuyos resultados aparecen en la Figura 6.1:

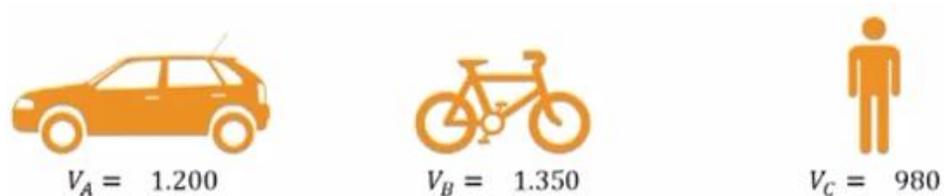
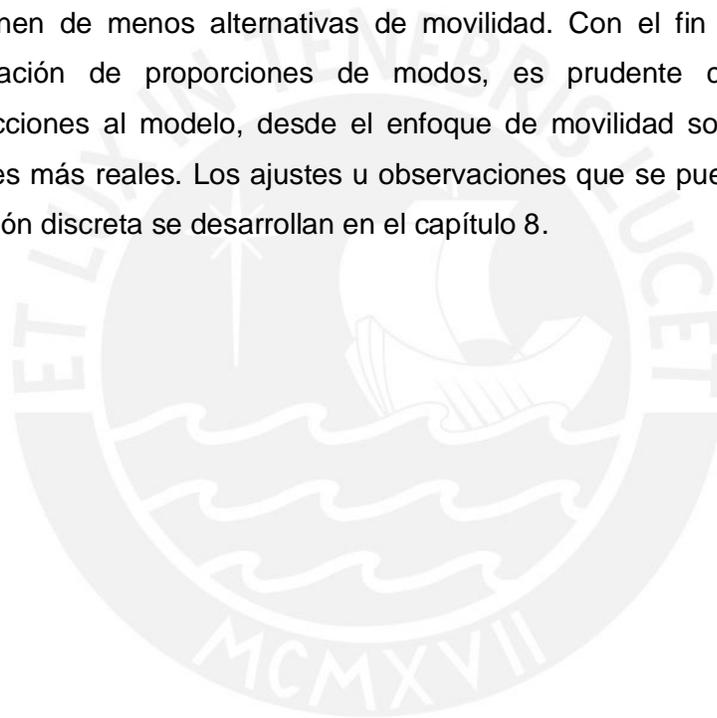


Fig 6.1 Tres alternativas de transporte en la etapa de partición modal usando el modelo de elección discreta. Fuente: Adaptado de UC (2015)

$$V_A = \frac{\exp(V_A)}{\exp(V_A) + \exp(V_B) + \exp(V_C)} \quad (6.6)$$

En el ejemplo, el modo con la menor utilidad será aquel que implique un mayor costo y tiempo que los otros. Basándose en la Ec. 6.4, se puede obtener la expresión en 6.6. Así, se obtiene que un 18% de las personas usaría el auto, un 80% la bicicleta y un 2% iría a pie. Del ejemplo, se evidencia que los modos de transporte elegibles están disponibles en igual medida a cada individuo, lo cual no representa fielmente la realidad, considerando que no todos tienen el auto a libre disposición. En ese sentido, se observa que el enfoque tradicional puede obviar a grupos de población que disponen de menos alternativas de movilidad. Con el fin de reducir el error en la estimación de proporciones de modos, es prudente considerar la adición de restricciones al modelo, desde el enfoque de movilidad sostenible, a fin de obtener valores más reales. Los ajustes u observaciones que se pueden realizar al modelo de elección discreta se desarrollan en el capítulo 8.



CAPÍTULO 7 ASIGNACIÓN DE VIAJES

La etapa de asignación de viajes es la última etapa dentro del esquema clásico de cuatro etapas en la modelación del transporte. En esta etapa, la cantidad de viajes (obtenida de la etapa de distribución de viajes) que ocurren en un área bajo ciertos modos (obtenidos de la partición modal), se asigna a la red vial a través de diversas rutas las cuales representan la conexión final entre cada par origen-destino existente en el área de transporte. El principal objetivo de esta etapa es poder representar los flujos agregados de viajes en una red de transporte. El problema que comprende todo modelo de asignación de viajes, se suele dividir en dos procesos: en primer lugar, se debe definir un **modelo de generación de rutas de elección de viaje** de las personas, para luego “cargar” o **asignar la matriz de viajes**, obtenida en la etapa anterior, a las rutas ya identificadas.

7.1 Introducción

Para desarrollar un modelo de asignación de viajes, es necesario conocer cuáles son los factores que determinan que los viajes observados en un área se realicen por ciertas rutas o sentidos (ej. viajes norte-este en una ciudad) entre un par origen-destino. En primer lugar, es necesario hallar relaciones dentro de la interacción entre la oferta y demanda de transporte a fin de estimar costos que guíen la distribución de flujos en la red. En el área de la ingeniería de tráfico, estas relaciones se encuentran en los gráficos de **flujo-velocidad o flujo-tiempo de viaje**, los cuales muestran cómo para diferentes niveles de flujo vehicular, la velocidad del flujo o el tiempo de viaje varía (Figura 7.1). Estas gráficas son empleadas en países como Estados Unidos, a través de manuales como el Highway Capacity Manual, para definir niveles de servicio en carreteras o vías rápidas (TRB, 2000). Paralelamente, en el contexto urbano, estas gráficas permiten estimar los costos promedios de cada enlace en la red, los cuales se asume están en función principalmente de los flujos del mismo enlace.

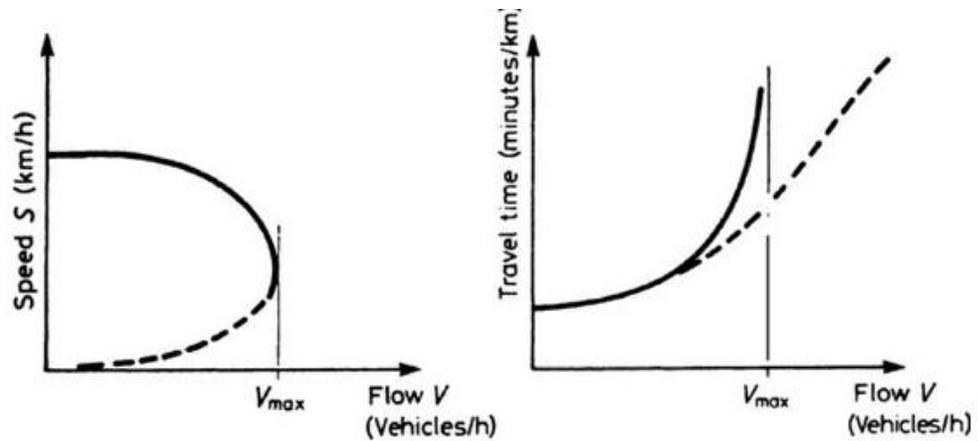


Fig 7.1 Relación tradicional de flujo-velocidad y flujo-tiempo de viaje en vías rápidas. Fuente: (Ortúzar, 2011)

De la Figura 7.1, se puede entender de la relación flujo-velocidad, que conforme el flujo de viajes aumenta, la velocidad disminuye hacia un punto donde el flujo es máximo, en el cual se dice que el flujo corresponde con la capacidad de la vía (Cabrera, 2015). En la relación flujo-tiempo de viaje (vinculada con el concepto de costo), en cambio, al incrementarse el flujo, el tiempo de viaje (costo) nunca deja de aumentar. Teóricamente, si la velocidad del flujo llega a cero, el tiempo de viaje sería infinito; sin embargo, considerando que en la realidad esto no ocurre, se opta por estimar un crecimiento continuo, como se identifica en la línea punteada. Esta función de costo es relevante, pues de ella se desprende la teoría de elección de ruta a desarrollar más adelante.

A pesar de la idea de relación flujo-costo previa, es oportuno discutir la asunción principal de estas funciones en el contexto de la ciudad. Considerando que en el casco urbano a diferencia de las carreteras, la mayoría de viajes ocurrirán en zonas densas, no es apropiado asumir que el costo de un enlace depende solo del flujo de la vía, sino también de los flujos transversales o paralelos a su alrededor (ej. flujos en intersecciones viales). De esta manera, se entiende que en zonas urbanas densas, donde se generan situaciones de congestión, la función de costo tendría que ser más compleja.

De acuerdo con Ortúzar (2011), diversos especialistas lidian con el problema de diseñar y calibrar las funciones de costo-flujo de los enlaces de la red. Por un lado, no se logran explicar las demoras absolutas a partir de las condiciones de flujo, siendo la congestión la principal razón de ello. Por otro lado, la naturaleza misma de las

intersecciones genera no solo aleatoriedad de llegada de vehículos, sino que también algunas de ellas funcionan como cuellos de botella, lo que ocasiona que se obtengan valores de demora muy desiguales entre enlaces cercanos.

No obstante las complicaciones anteriores, se siguen diseñando metodologías para obtener mejores gráficas costo-flujo en el área urbana, aunque aún el rol de las intersecciones en el cálculo del tiempo es limitado. Como ejemplo, se mencionan algunas prácticas y recomendaciones en el uso de las relaciones costo-flujo, en los modelos de asignación de viajes en el Reino Unido (TAG, 2014). Para vías urbanas, se define la velocidad de circulación en los enlaces usando una ecuación lineal que tiene como variables la velocidad a flujo libre y el flujo observado (Ec.7.1). Luego, la velocidad a flujo libre se halla mediante otra ecuación, según si la vía se ubica en una zona central (Ec.7.2) o no-central (Ec.7.3).

$$V = V_0 - 30 \times Q / 1000, \quad (7.1)$$

$$V_0 = 39.5 - 5 \times \text{INT} / 4 \quad (7.2)$$

$$V_0 = 64.5 - \text{DEVEL} / 5 \text{ km/h}, \quad (7.3)$$

En zonas centrales, la variable que define la velocidad es el número de intersecciones cada cierto tramo a lo largo del enlace (INT), mientras que en zonas no-centrales, la variable principal es el porcentaje de la red que está en desarrollo urbano (DEVEL). Si este valor es 0%, la zona es un espacio abierto, y si fuese el 100%, esta tendría la misma atracción de viajes que una zona central (ver Tabla 7.1). Se puede verificar que las ecuaciones lineales empleadas simplifican la forma de la gráfica flujo-velocidad esperada de la Fig. 7.1, de manera que su aplicación es limitada, especialmente en situaciones con enlaces congestionados (cuando los flujos superan la capacidad de la vía), donde la influencia de las intersecciones en el cálculo de las demoras es preponderante.

Tabla 7.1 Valores típicos de las variables en las relaciones flujo-velocidad en vías urbanas del Reino Unido. *Fuente: Adaptado de (TAG, 2014)*

Definición de variables usadas en relaciones Velocidad/Flujo para vías urbanas			
Símbolo	Descripción de la variable	Valores típicos	
		Min	Max
INT	Frecuencia de principales intersecciones a lo largo de la vía de la red (no/km)	2	9
DEVEL	Porcentaje de la red de transporte que está en desarrollo urbano (%)	50	90
V	Velocidad promedio de los vehículos (km/h)	n/a	n/a
Vo	Velocidad a flujo libre (km/h)	28	48
Q	Flujo total, todos los vehículos, por carril estándar (veh/h/3.65m carril)	0	1200
Qc	Capacidad: definida como el máximo valor realista de Q (veh/h/3.65 m carril)	800	

7.2 Metodología de la etapa de asignación

Como se mencionó al inicio del capítulo, el objetivo de esta etapa es representar los flujos de viajes en una red. El problema puede ser analizado desde dos perspectivas: una agregada y otra desagregada. A nivel agregado, es necesario obtener los flujos promedio que recorren el área urbana, así como estimar los costos promedio de viaje entre las zonas definidas. En un nivel desagregado, es útil conocer las rutas exactas (enlace por enlace) de cada par origen-destino, para analizar, por ejemplo, futuras actuaciones en el diseño vial (ej. diseño de intersecciones, definición de ciclos semafóricos, ampliación de vías), así como en la red de transporte público (ej. diseño de rutas de buses). Estos objetivos se logran considerando que, una vez que se disponen de las funciones de costo en los enlaces así como la matriz de viajes, obtenida de la etapa de distribución, se necesitan adicionar principios de elección de ruta. Estos principios o reglas permitirán asignar los valores de las celdas de la matriz proporcionalmente a través de diversos enlaces o rutas, según los costos que estos presentan, de acuerdo a las gráficas flujo-costo. A continuación se presentan dos etapas de desarrollo de los principios de elección de ruta en los modelos de asignación.

7.2.1 La elección de ruta

La elección de la ruta en todo modelo de asignación asume que la persona es un ser racional, y que por tanto, buscará minimizar el costo que implica desplazarse entre dos puntos específicos. Al igual que en los modelos de elección discreta en la partición modal, se deben estimar cuáles son los principales factores que influyen la elección de la ruta más eficiente. Entre estos se pueden distinguir al costo monetario (ej. tarifas, peajes), a la distancia o al tiempo de viaje. Según Ortúzar (2011), es práctico considerar a la distancia como factor proporcional al costo monetario, y que por simplicidad del modelo se toman en cuenta al tiempo y al costo expresado en dinero como los más importantes, aunque muchos especialistas coinciden que es el tiempo el factor de mayor influencia. Un ejemplo de la importancia del tiempo en los modelos de asignación, es el uso de las relaciones flujo-velocidad, donde se emplean variables de tiempo en el cálculo del costo en cada enlace.

No obstante, en la práctica, se ha demostrado que la estimación racional de los flujos en función de los costos asumidos por el modelador solo explican los flujos en alrededor del 60-80 % de las rutas observadas en campo (Ortúzar, 2011). Además, investigadores como Peter Bonsall han mostrado que pese a que existan aplicaciones tecnológicas que aconsejen a los conductores de las rutas más óptimas, aún permanece un factor subjetivo que explica que se usen otras rutas en cerca del 20% del total de viajes (Bonsall, 1992 y Outram, 1978).

En ese sentido, es necesario analizar las razones asociadas al factor subjetivo de la elección de la ruta. Por un lado, se entiende que las percepciones de todas las personas en cuanto a la ruta óptima son diferentes; más aún, cada usuario puede tener preferencias. En segundo lugar, influye el nivel de conocimiento de la red, lo que limita la disponibilidad de alternativas para cada usuario. Por último, existen los efectos de la congestión en ciertos enlaces, los cuales generan que rutas cortas se tornen ineficientes cuando se sobrepasa su capacidad.

De acuerdo a la manera en que se prioricen estas tres limitaciones a considerar en el modelo de asignación, se puede elaborar una estructura para el desarrollo del modelo (Tabla 7.2).

Tabla 7.2 Estructura de un modelo de asignación de viajes, según las limitaciones consideradas en la elección de ruta. *Fuente: Adaptado de (Ortúzar, 2011)*

		¿Se consideran los efectos estocásticos?	
		NO	SI
Clase de usuario simple	Sin restricción de capacidad	Todo o nada	Estocástico puro: Dial, Burrel
	Con restricción de capacidad	Equilibrio de Wardrop (EU)	Equilibrio estocástico del usuario (SUE)
Clase de usuario múltiple	Sin restricción de capacidad	Todo o nada con usuario múltiples	Estocástico con usuario múltiples: Dial, Burrel
	Con restricción de capacidad	Equilibrio de Wardrop con usuario múltiple	Equilibrio de usuario estocástico con múltiples usuarios

De la Tabla 7.2, se observa que el factor subjetivo vinculado a la percepción se puede superar considerando múltiples clases de usuarios, tal como se hizo en las etapas de generación o distribución. Luego, el factor vinculado al desconocimiento de la red, se puede abordar aplicando al modelo un factor probabilístico (estocástico), que permita generar rangos de probabilidad a ciertas rutas cuyos costos son calculados objetivamente, tal como en la etapa de partición modal. Por último, es posible considerar la congestión como condicionante de la elección de ruta, si la capacidad de las vías es incluida en la red.

7.2.2 La construcción de árboles de viajes

Una vez que se escoge la estructura del modelo de elección de ruta, es preciso hallar un algoritmo matemático que defina la ruta más apropiada para determinado viaje. Así, se conoce como *“tree building”* al proceso de encontrar el camino con el menor costo entre dos puntos o nodos en una red de transporte (ver Figura 7.2) (UW, 2016). Su utilidad no se restringe al hallazgo de la ruta óptima, sino que se pueden usar los árboles de viajes para extraer información de costo en la red final. Por ejemplo, el proceso conocido como *“skimming the tree”* consiste en hallar el costo total de la ruta entre dos nodos o zonas (en unidades de tiempo), lo cual sirve de parámetro de calibración del modelo.

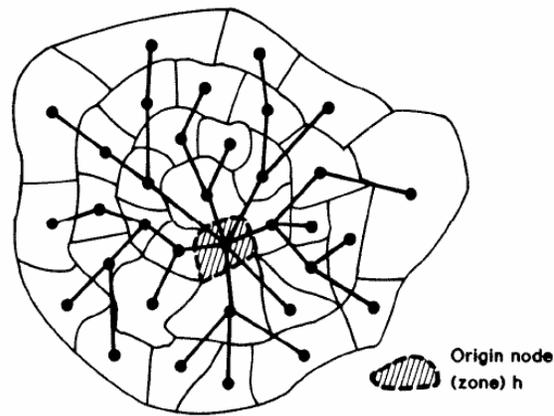


Fig 7.2 Árbol de viajes entre en el nodo central de la zona H (origen) con el resto de nodos centroidales. *Fuente: (UW, 2016)*

Actualmente, la elaboración de árboles de viajes es completamente procesado por programas de computación a través del uso de algoritmos, los cuales siguen siendo materia de investigación y desarrollo. En el esquema tradicional de planificación, el algoritmo clásico en el proceso de “tree building” es el Algoritmo de Dijkstra, publicado en 1959 por el científico computacional holandés Edsger Dijkstra. El algoritmo calcula la ruta más corta (la que representa el costo más bajo) entre dos nodos en una red, a base de un nodo origen o fuente, desde el cual se elige el camino más corto hacia el nodo más cercano (ver Figura 7.3); a partir de esto, las distancias se acumulan y el proceso vuelve a empezar hasta llegar al nodo destino (Dijkstra, 1959).

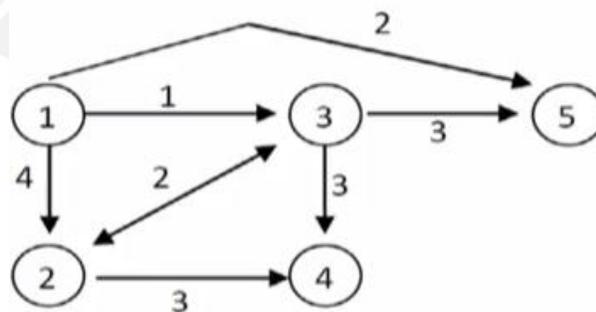


Fig. 7.3 Ejemplo de aplicación del Algoritmo de Dijkstra en el cálculo de la ruta más corta entre los nodos 1 y 5. *Fuente: (UC, 2015)*

7.3 Modelos de asignación de viajes tradicionales

7.3.1 Modelo de todo o nada

El modelo de asignación de todo o nada asigna todos los viajes entre un par origen-destino a la ruta más corta (con menos costo) de la red. Este modelo puede generar resultados irreales en situaciones donde existan rutas similares, con diferencias de costo pequeñas, pues el modelo asignará todos los viajes a aquella racionalmente menos costosa. Su utilidad es limitada, pues ignora la capacidad de las vías, lo que no permite observar la dispersión de flujos causado por la congestión. De esta manera, se considera que el modelo de todo o nada puede ser útil en áreas donde la red no es congestionada y los caminos se dispersen en el área, como en zonas interurbanas. En el contexto urbano, es posible emplear el modelo como herramienta de control de calidad, pues puede ayudar a proyectar líneas de deseo para los flujos, lo que constituye un indicador útil en la planificación de actuaciones a la red en el futuro (Mathew, 2008).

7.3.2 Modelo estocástico

Los modelos estocásticos surgen de la comprensión de que los usuarios de transporte no perciben los costos de viaje de la misma manera, así que es necesario aplicar un grado de variabilidad a la elección de ruta y su correspondiente asignación de viajes. A diferencia de los modelos todo o nada, es necesario considerar además segundas mejores rutas, en las que se distribuya un porcentaje de los viajes. Uno de los alcances del modelo es el de simulación, en el que se establece una distribución de probabilidad de los costos percibidos por las personas, situando el costo medido como media. Una vez hallado el costo percibido de la distribución, se procede a estimar el camino más corto y sus alternativas más óptimas. Las ventajas de los modelos estocásticos se basan en el logro de generar una buena dispersión de rutas entre cada par origen-destino, lo que representa una situación real. Sin embargo, su principal desventaja es que la variabilidad establecida no alcanza a reconocer otros factores subjetivos como la preferencia de usuarios por ciertas rutas (Ortúzar, 2011), lo cual varía según el tipo de usuario o incluso el horario de viaje. Por ejemplo, en viajes nocturnos, es probable que un porcentaje de usuarios eviten rutas que conocen poco o que consideran peligrosas, pese a que el costo de estas sea bajo.

7.3.3 Modelo basado en el equilibrio del usuario (EU)

El modelo basado en el equilibrio del usuario (EU), toma en cuenta el factor de la congestión en la dispersión de flujos en la red, siendo el elemento principal la capacidad de las vías. En este modelo, el comportamiento del conductor o usuario de un servicio de transporte es analizado según el primer principio de Wardrop, el cual establece que se llega a un equilibrio en la red de tráfico cuando ningún viajero puede reducir su costo al cambiar de ruta (Wardrop, 1952). La aplicación de este principio en el modelo requiere el uso de funciones tiempo-flujo, como se revisó en la sección 7.1, con las que se asocian costos a distintos enlaces. Así, se alcanzará el equilibrio cuando los costos de las distintas rutas creadas es el mismo. Como ejemplo, de la Figura 7.4, se entiende que, según la capacidad del bypass y el centro de la ciudad, el flujo total se distribuirá en proporciones tal que el costo de A a B no puede ser reducido para cualquier nuevo viajero independientemente de la ruta que tome.

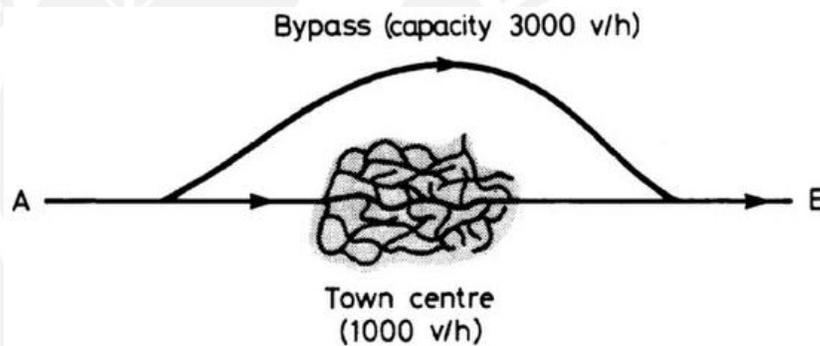


Fig. 7.4 Ejemplo de asignación en dos rutas con distinta capacidad. *Fuente:* (Ortúzar, 2011)

A partir del principio de equilibrio del modelo, se han formulado diversos algoritmos matemáticos que permitan la asignación de viajes a un nivel agregado; sin embargo, aún persiste la dificultad de hacer converger lo obtenido del modelo al principio de Wardrop, tarea que puede resultar muy compleja (Ortúzar, 2011).

Por otro lado, es necesario señalar la existencia de un “Segundo Principio de Wardrop”, también llamado equilibrio del sistema (EO). Se considera a este equilibrio como un principio de diseño, pues establece que se logrará el equilibrio social cuando el costo promedio de las rutas creadas en toda la red sea el mínimo, y esto se logra cuando los usuarios son persuadidos a tomar las rutas más óptimas. En la actualidad, por ejemplo, los cargos por congestión en los centros urbanos buscan adaptarse a este principio cuando desincentivan el paso por rutas cortas, debido al incremento en el

costo. Asimismo, existen herramientas tecnológicas (ej. aplicativos móviles, GPS) que “guían” a usuarios de transporte o conductores a tomar “rutas óptimas”. Algunos estudios han demostrado que estas herramientas aún no logran persuadir del todo a los conductores, debido a factores subjetivos como la experiencia y preferencia de rutas (Bonsall, 1992).



CAPÍTULO 8 LA PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE Y LA SOSTENIBILIDAD

En el presente capítulo, se desarrollan las relaciones que vinculan al proceso de planificación del transporte urbano con los conceptos del reciente enfoque de sostenibilidad aplicada al transporte, el cual se conoce como un enfoque de movilidad sostenible. Como se mencionó en sección de hipótesis (Capítulo 1.3), el modelo clásico de cuatro etapas puede no ser compatible con los nuevos criterios de sostenibilidad, de manera que, para resolver dicha cuestión, es necesario conocer sobre el trasfondo de estos criterios, y validar si su aplicación es beneficiosa en el complejo y largo proceso de planificación del transporte urbano. En primer lugar, se profundizará sobre el concepto de movilidad sostenible y su relación con un proceso de optimización del uso de la energía que consume la movilidad en las ciudades. Luego, se analizarán los aspectos estructurales del modelo de cuatro etapas que pueden ser contrarios, o al menos ineficientes, respecto a este nuevo enfoque. Por último, se desarrollarán las características que un nuevo modelo de planificación vinculado a la movilidad sostenible debe poseer, y se incluirá, como ejemplo, su aplicación actual en el contexto europeo.

8.1 El paradigma de la movilidad sostenible

El concepto de movilidad sostenible surge de un proceso de comprensión de cómo se debe desarrollar la movilidad urbana en las ciudades. Desde hace 50 años, la movilidad en las ciudades se ha concebido en términos de circulación de vehículos conectando cualquier par de nodos en una red vial. Conforme las ciudades crecieron en población y tamaño, las externalidades asociadas a la movilidad, como la congestión o la contaminación, generaron discusión en torno al enfoque con el cual abordar estos problemas. Un primer enfoque estuvo directamente relacionado favorecer una mejor movilidad basada en el uso del vehículo privado para los viajes cotidianos. Así, la estrategia se basó en reducir los costos asociados a esta forma de movilidad mediante el incremento de la capacidad vial. Sin embargo, esto solo atenuó el problema a corto plazo, dado que se ha demostrado que el incremento de infraestructura vial no evita un incremento de la demanda a largo plazo (Buchanan, 1964).

En las próximas décadas, nuevos enfoques surgieron como consecuencia de un proceso de “evolución” en las ciudades, al desechar el modelo de movilidad basado en el auto particular por uno basado en priorizar el transporte colectivo (trenes de cercanías, buses y sistemas de metro de alta capacidad), reconociendo así que lo importante no es la cantidad de vehículos pueden circular con facilidad, sino el número de personas que logran satisfacer sus viajes con eficiencia (Dextre y Avellaneda, 2014).

Desde hace menos de dos décadas, la preocupación mundial por el cambio climático, el cual se oficializó de alguna manera con la firma del Protocolo de Kioto, llevó a muchos países a empezar a considerar y reforzar los aspectos medioambientales de sus legislaciones vinculados a la movilidad en las ciudades. Estos aspectos incluyen como objetivos la reducción de las emisiones de efecto invernadero, así como el logro de una eficiencia energética en el modelo de transporte urbano. A estos dos aspectos previos, se suele adicionar otro vinculado a la funcionalidad de la movilidad urbana y que hace referencia al concepto de justicia social, que propone se debe abordar un planeamiento que logre una mayor equidad en el acceso a la movilidad de todos los ciudadanos. La conjunción de estos tres ámbitos (preocupación por el impacto ambiental, la eficiencia energética y la justicia social) han construido el concepto de movilidad sostenible, el cual puede disgregarse según cada uno de sus aspectos (Herce, 2009).

En primer lugar, la sostenibilidad ambiental incide en una movilidad urbana de bajas emisiones de gases efecto invernadero. Esto involucra por un lado apostar por un objetivo de partición modal favorable al transporte colectivo en desmedro del particular. Asimismo, consiste en promover una política de recambio del parque automotor con perspectiva medioambiental como ocurre, por ejemplo, en normativas que obligan el cambio de las tecnologías de los motores diésel (ej. de Euro IV a Euro V) o la promoción de los vehículos eléctricos.

En segundo lugar, la sostenibilidad energética consiste en abordar una perspectiva de eficiencia energética en el desarrollo de la movilidad de los ciudadanos. Este aspecto refleja la importancia del territorio como plataforma de análisis. En el modelo basado en el auto, se generaba una paradoja en el sentido de que la construcción indiscriminada de infraestructura vial produce dispersión en la ciudad, lo que genera un círculo vicioso de movilidad insostenible (Herce, 2009). En cambio, desde una perspectiva sostenible,

se apunta a que la ciudad sea más compacta, a fin de lograr que los viajes cotidianos puedan ser más cortos, y así favorables para modos de consumo energético casi nulo como la bicicleta o la caminata (ver Figura 8.1).

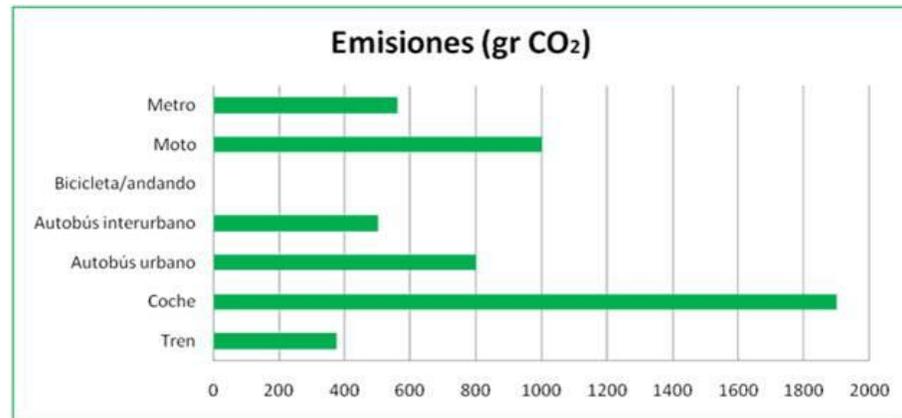


Fig. 8.1 Comparación de emisiones de CO₂ por modos de transporte, considerando un viaje de 10km. *Fuente: Pag. Web Gas Natural Fenosa*

Por último, la sostenibilidad social está vinculada a la accesibilidad de las personas a la movilidad. Así, se piensa en múltiples clases de usuarios, identificando aquellos con limitaciones y necesidades específicas como los niños, ancianos y demás personas con movilidad reducida, a fin de promover espacios públicos y servicios de transporte seguros y accesibles para todos. También, llama a la inclusión de todos los modos de transporte existentes en el espacio vial, para que estos puedan conectar la mayor cantidad de puntos en la ciudad con facilidad, priorizando a aquellos modos que favorezcan y retroalimenten los primeros dos aspectos de la movilidad sostenible.

8.2 Sostenibilidad en el modelo clásico de cuatro etapas

En los capítulos 3 al 7 se desarrolló la estructura del modelo de cuatro etapas, el cual permanece como herramienta importante dentro de los esquemas de planificación tradicionales. Ahora, es necesario evaluar si este esquema contiene los elementos propios de un enfoque de movilidad sostenible en sus tres niveles de desarrollo: el medioambiental, el energético y el de justicia social. Por tanto, es conveniente analizar cuál es el trasfondo del esquema tradicional, lo que consiste en descubrir las principales asunciones o hipótesis inherentes a este modelo.

Como se mencionó en el Capítulo 2, el esquema tradicional de planificación tiene como objetivo determinar los flujos de viajes resultantes de la interacción entre las

actividades de las personas (sistema de actividades) y la infraestructura vial actual (sistema de transporte), por medio del procesamiento de data que incluye tanto las características de la población como las del área urbana a analizar. No es difícil deducir que este proceso es cíclico, puesto que los nuevos flujos estimados servirán para adaptar la red vial, preparándola así para las nuevas condiciones supuestas a futuro. Así, este modelo se puede concebir como uno basado en un “enfoque de demanda”, el cual planifica la generación de infraestructura vial (relacionada con la oferta) a partir de relaciones preconcebidas dentro del sistema de actividades (Herce, 2009). En la Figura 8.2, se ilustra un diagrama explicativo del razonamiento de este enfoque.



Fig. 8.2 Enfoque de demanda, del que se basa el modelo clásico de planificación de cuatro etapas. *Fuente: (Herce, 2009)*

Se ha criticado que este enfoque de demanda, como herramienta de planificación, solo ha generado mayor dispersión urbana, lo que ha incrementado los costes promedio de transporte en las urbes como consecuencia de la política de mayor infraestructura vial en la solución al problema del tráfico en las ciudades. Por otro lado, autores como Manuel Herce inciden en la idea de que este modelo privilegia como elemento fundamental de la movilidad urbana el uso del automóvil, o al menos evita perjudicar el espacio vial empleado por el auto en relación con otros modos. Por ello, corresponde dar una mirada analítica a cada etapa del modelo clásico, desde una perspectiva de la movilidad sostenible, tomando en cuenta los métodos y consideraciones que este esquema plantea.

8.2.1 Generación de viajes

Como se desarrolló en el Capítulo 4, en la etapa de generación de viajes, se emplea data relacionada a características de la población estudiada con el fin de generar ratios de viaje (cociente del número de viajes por tipo de persona y día) a nivel agregado (por zonas) o desagregado (por hogares o individuos). Desde una perspectiva sostenible y de reconocimiento de todos los actores de la movilidad, se identifican dos aspectos inherentes al modelo de generación que no siguen esta línea. Una de ellas es la

discriminación entre viajes obligados y opcionales, los cuales sirven como instrumento para clasificar los ratios de viajes obtenidos. Actualmente, el concepto de obligatoriedad en ciertos viajes como factor de clasificación es discutible, pues en muchas ciudades se ha observado que hay viajes recurrentes con motivos no ocupacionales que en su conjunto pueden igualar o superar al porcentaje de viajes al trabajo o estudio, tal como lo muestran algunos estudios de movilidad (GC, 2006).

Por otro lado, se identifica que en los modelos de generación de viajes, ciertos atributos en los atributos de la población seleccionados están estrechamente ligados al modo de transporte privado. Por ejemplo, se suele presuponer en las ecuaciones lineales que a mayor ingreso familiar o tenencia de auto particular en el hogar, se generan más viajes. Si bien esto fue creado para representar una tendencia real, es también cierto que en el modelo tradicional se omiten variables cuya función refleje la asunción de un enfoque sostenible. En ese sentido, sería beneficioso añadir al modelo atributos relacionados con otros modos, a fin de identificar también ratios de viajes al día para personas que usan solo el transporte público o viajes en bicicleta, de manera que se pueda conocer la incidencia de estos viajes en distancias cortas.

8.2.2 Distribución de viajes

Como se recuerda, el objetivo de esta etapa es obtener la matriz de viajes del área de estudio por clase de usuario, a partir de la producción de viajes estimada en la etapa anterior, así como de una función decreciente de costo. La obtención de la matriz de viajes es uno de los pasos más importantes en el proceso de cuatro etapas, por cuanto de ella dependen directamente los flujos asignados a la red. Por ello, es prudente observar ciertos aspectos en esta etapa que no se condicen con un enfoque sostenible.

En primer lugar, se observa que las matrices obtenidas registran solo los viajes interzonales, y no los intrazonales, donde se producen viajes cortos (ej. viajes a pie o en bicicleta). Esto se debe a que la diagonal de la matriz (donde se contabilizan estos viajes) suele llenarse con ceros. La ocurrencia de esta omisión es casi inevitable en el modelo clásico, básicamente por dos factores. Por un lado, la data recabada de la etapa de generación corresponde a desplazamientos de largas distancias, de forma que cualquier valor de viaje intrazonal es poco confiable. Por otro lado, algunos autores

arguyen que trabajar con matrices con diagonal llena dificultan los procesos de actualización de matrices y de calibración. (Ortúzar, 2011).

Asimismo, es valioso observar el uso de los factores de crecimiento durante la etapa de distribución, como método para proyectar escenarios a futuro. Este método asume que el sistema de actividades crece linealmente en el tiempo, lo cual replica la distribución de viajes en el horizonte de años estimado. Si bien el uso de factores es necesario en proyectos con ejecución a mediano plazo, su uso en horizontes largos es poco confiable, pues se ignora la variabilidad del uso del suelo urbano. Así, por ejemplo, se puede omitir el impacto de nuevas actuaciones urbanísticas, tales como centros urbanos o de comercio, los que actúan de zonas de atracción de viajes.

8.2.3 Partición modal

En la etapa de partición modal del modelo tradicional se obtienen los porcentajes del uso de determinados modos por medio de funciones probabilísticas que consideran una utilidad asociada a cada modo de transporte, según diversos atributos como el tiempo de viaje, el confort o el costo monetario del modo. Un principio de los modelos de elección discreta es que el individuo dispone libremente un número de alternativas, incluyendo al auto, lo cual excluye de los resultados finales a las elecciones de un grupo de población que no lo posee.

Por un lado, si bien se puede aplicar las herramientas del modelo a casos particulares donde no se considere al auto, el hecho de que las matrices ignoren viajes, donde sería más factible la elección de modos de bajo consumo energético, impide que el modelo sea útil para el análisis de modos como la bicicleta.

Por otro lado, como observación se puede anotar que uno de los objetivos del enfoque de movilidad sostenible es inducir a la preferencia por modos de bajo consumo cuando sean convenientes. En el modelo clásico, los porcentajes modales solo sirven como parte del modelo, cuando pueden ser usados como parámetros de eficiencia (Herce, 2009).

8.2.4 Asignación de viajes

La etapa de asignación de viajes tiene como objetivo estimar el flujo resultante de viajes en la red de transporte preestablecida. Una de las principales limitaciones de los modelos de asignación es el aspecto subjetivo de la elección de la ruta, el cual se

suele dividir en el factor del desconocimiento de la red, la congestión en las vías y la experiencia del usuario en el uso de ciertas rutas. En ese sentido, un primer aspecto del modelo de asignación tradicional que no sigue un enfoque sostenible es que sigue siendo un modelo de circulación de vehículos. Por tanto, las mejoras en sus métodos se basan en la optimización del equilibrio del sistema (Wardrop) o en incluir la aleatoriedad de las elecciones de ruta en auto. Si bien es posible adaptar estos modelos a otros modos como el transporte público o sistemas de modos no motorizados (ej. bicicletas), aún estos modelos son primigenios, aunque continúan en desarrollo (Herce, 2009).

Por otro lado, cabe resaltar que la etapa de asignación de viajes, al ser etapa final, suele ser empleada para “justificar” la creación de infraestructura de transporte según el enfoque clásico de demanda. De acuerdo con Herce (2009), la planificación de estos proyectos (ej. Ampliación de vías, intercambios viales) constituye una paradoja, pues estos se sustentan al asignar toda la nueva demanda de viajes (la cual se considera la de hora pico) a través de ellas, lo cual supone omitir el rol de la congestión como regulador de la capacidad. De esta manera, se proyectan vías, sobre las cuales surge una nueva demanda, originada por el aumento programado de la capacidad. Esta estrategia es cuestionada, pues la concentración de la demanda en un solo eje genera más congestión que una distribución más equitativa en la red de transporte.

8.3 Un nuevo enfoque en la planificación del transporte

En la actualidad, existen procesos de planificación del transporte con un enfoque sostenible en muchas ciudades en el mundo. Esto es posible, pues se dispone de una legislación que permite sentar las bases del enfoque de movilidad sostenible dentro del marco de la planificación del transporte. En Brasil, por ejemplo, la Ley Federal 12.587/2012 de Movilidad Urbana significó un gran avance en la implantación del nuevo paradigma de movilidad, al promover más transporte colectivo y no motorizado, crear un sistema de gestión de la demanda (GDT), así como reconocer la movilidad como derecho, lo cual devino en una reducción promedio en las tarifas y la mejora de la calidad del servicio de transporte público, en respuesta a múltiples protestas en varias ciudades brasileñas (Gutiérrez, 2014). Por otro lado, Francia es un claro ejemplo de la apuesta por una movilidad sostenible como política de Estado. Existen leyes que respaldan el enfoque como la Ley de Calidad del Aire, que regula uno de los tres aspectos de la sostenibilidad, que es la medioambiental. Otras leyes se sostienen en el

aspecto energético, como la recién aprobada Ley de Transición Energética, que ofrece incentivos fiscales a aquellas empresas que promuevan a sus trabajadores a desplazarse en bicicleta al trabajo.

Si bien el sistema de leyes vigente es importante para sostener un modelo de movilidad sostenible, es necesario contar con herramientas que permitan construir procesos de planificación eficientes guiados por este enfoque. Una de estas herramientas son los planes de movilidad urbana sostenible (PMUS), los cuales se desarrollan a continuación.

8.3.1 Planes de movilidad urbana sostenible (PMUS)

Los PMUS son herramientas de planificación estratégica sobre la movilidad urbana en las ciudades (Figura 8.3). Su utilidad reside en el hecho que no enfocan el planteamiento de sus recomendaciones en el análisis del sistema de transporte establecido (el lado de la oferta), sino que abordan ambos lados de la relación sistema de transporte – sistema de actividades, a fin de gestionar el equilibrio resultante (flujos de viajes) desde un enfoque sostenible. Para ello, estos planes dejan de lado el lenguaje de flujos de vehículos tradicionales por flujos de viajes de todos los modos de movilidad de las personas, deja un enfoque de solución única por uno donde distintos escenarios objetivo son evaluados, y principalmente cambian el uso de los parámetros de movilidad como simples datos del problema hacia objetivos de solución (ej. la partición modal como parámetro de análisis).

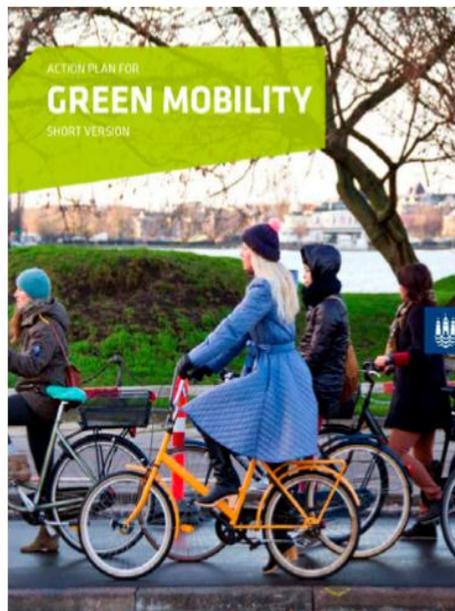


Fig. 8.3 Plan de Movilidad Urbana Sostenible en Copenhague, Dinamarca. *Fuente:* (GIZ, 2014)

Como se mencionó previamente, uno de las características distintivas de los PMUS es el establecimiento de objetivos antes de su realización. En algunas ciudades, el objetivo es lograr un reparto modal favorable al transporte público en desmedro del privado como solución al problema de la congestión vehicular; sin embargo, es necesario anotar que en un enfoque sostenible, el principio de integración también es importante, pues se busca un desarrollo balanceado de todos los modos (motorizados o no) como principio para fomentar un cambio hacia modos más sostenibles (Figura 8.4). Por otro lado, un plan de movilidad sostenible debe abordar la necesidad de movilidad de todos los ciudadanos, pues este no se basa solo en el tráfico urbano, sino en las personas, y por tanto debe seguir un principio participativo en la planificación, que vincula a todos los actores de la movilidad como autoridades de transporte, políticos, y principalmente los ciudadanos (GIZ, 2014).



Fig. 8.4 Convivencia de distintos modos de transporte según el diseño vial en Hannover, Alemania. *Fuente: Propia*

Si bien todas las características apuntan al desarrollo de los tres ejes de la movilidad sostenible ya desarrollados, aún se reconoce como desafío la necesidad de contar con modelos de transporte confiables en la estimación de la demanda de viajes, lo que constituye un proceso fundamental en la preparación de los PMUS. En ese sentido, en el contexto europeo, la Comisión Europea para la Movilidad y Transporte recomienda emplear modelos de transporte tradicionales (como el modelo de cuatro etapas) en la elaboración de planes de transporte estratégicos (ver Tabla 8.1), aunque teniendo en cuenta que la fidelidad de sus resultados estará sujeta a la cantidad de información que se logre recolectar (CE, 2014).

Tabla 8.1 Recomendación del uso de modelos de transporte en la implementación de planes de movilidad urbana sostenible. *Fuente: (CE, 2014)*

Objetivo / Alcance	Elaboración de una herramienta disponible
Uso de la tierra y ordenación del territorio (por ejemplo, planes estratégicos, PMUS)	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte y uso de suelo en modelos integrados • Modelo de cuatro pasos
Planificación del transporte urbano (por ejemplo, PMUS, planes de tráfico)	<ul style="list-style-type: none"> • Transporte y uso de suelo en modelos integrados
Planificación del servicio de transporte público (por ejemplo, rutas de planificación, frecuencia, tarifas)	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de cuatro pasos
Estudios de viabilidad (por ejemplo, las previsiones de tráfico para una nueva infraestructura de carreteras)	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos multimodales
Diseño (por ejemplo el diseño de una rotonda)	<ul style="list-style-type: none"> • Modelos unimodales

Como se mencionó en la sección anterior, el modelo clásico de cuatro etapas adolece de procedimientos que no se condicen con un enfoque sostenible, de manera que se entiende que su aplicación estará condicionada a un proceso de adaptación que logre implantar un nuevo enfoque de movilidad dentro del modelo de transporte tradicional (Herce, 2009).

CAPÍTULO 9 ESTUDIOS DE MODELACIÓN DEL TRANSPORTE EN LIMA

9.1 La planificación del transporte urbano en Lima

La situación del transporte urbano de Lima, que comprende el escenario actual del tráfico vial y el funcionamiento del transporte público, es para la gran mayoría de limeños el segundo problema más importante de la ciudad después de la inseguridad ciudadana (Bielich, 2009). A lo largo de las recientes décadas, se han implementado diversos proyectos de infraestructura del sistema de transporte de la ciudad, entre las que se cuentan obras viales como la Vía Expresa de Paseo de la República, pasos a desnivel en varias intersecciones, hasta la reciente vía rápida “Línea Amarilla”. En relación al transporte público, en cambio, en la última década se construyeron solo dos ejes de transporte masivo: el Metropolitano y la Línea 1 del Metro (Figura 9.1). Pese al conjunto de proyectos de transportes realizados, la situación de congestión vehicular en muchas zonas de la ciudad parece no haberse atenuado, sino en continuo aumento.

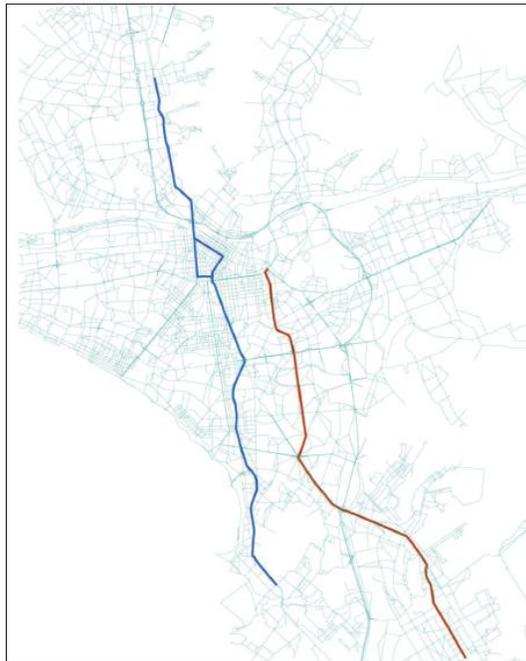


Fig. 9.1 Sistemas de transporte masivo de Lima, ambos planificados de forma independiente. *Fuente: (Táryet, 2013)*

Cabe preguntarse si la relación de estos proyectos estuvo guiada por un esquema público de planificación o no. La respuesta se deduce al revisar que los principales proyectos de infraestructura vial se conciben desde el uso del modo de vehículo

particular y en respuesta a la congestión de un área específica. Por ejemplo, un caso resaltante es el proyecto de construcción del Viaducto Subterráneo La Molina-Angamos, el cual plantea proyectar una vía en el eje este-oeste de uso exclusivo para el vehículo particular. En el contexto del transporte público, se han construido dos líneas de transporte masivo en base a planes de transporte, aunque ambos con enfoques independientes en lo relacionado a la cobertura de transporte público.

La ausencia de un sistema de planificación que integre todos los proyectos ha generado que no se tenga un calendario de proyectos programático, ni un esquema de gestión en materia de la movilidad urbana en la ciudad. La composición actual del transporte público es una consecuencia de esta situación. Por ejemplo, se sabe que el sistema se compone de cerca de 400 rutas de buses, los cuales tienen alto grado de superposición e ineficiente longitud (Figura 9.2). Actualmente, la Municipalidad de Lima está implementando un sistema de gestión más eficiente; sin embargo, aún persiste el problema de integración entre varias instituciones del Estado en la necesidad de un enfoque único a la movilidad de la ciudad.



Fig. 9.2 Desorden y congestión en el sistema tradicional de transporte público de Lima. *Fuente: Google Imágenes*

En los siguientes subcapítulos se analizan dos estudios que contienen un modelo de planificación de transporte; en particular, ambos están vinculados a la planificación del sistema de transporte público de la ciudad.

9.2 JICA: Plan Maestro Metropolitano al 2025

En este subcapítulo se describen los procedimientos elaborados en el modelo de transporte del estudio *“Plan Maestro Urbano para el área de Lima Metropolitana y Callao”* (JICA, 2012), elaborado por la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) para el Estado Peruano en el año 2012. El estudio presenta la realización de un modelo clásico de planificación del transporte de cuatro etapas, cuyo objetivo es estimar la demanda de viajes global del área metropolitana de Lima proyectada al 2025. Además, el plan busca servir de herramienta de planificación de transporte para la ciudad de Lima, al proponer al Estado Peruano inversiones en infraestructura vial y en la creación de un sistema integrado de transporte público para la ciudad, por medio de la implementación de líneas de metro y corredores de buses, cuyas rutas o ejes se proponen en el estudio.

A continuación se describen y analizan los procesos elaborados en cada una de las etapas del estudio, considerando la estructura metodológica del modelo de cuatro etapas desarrollado en capítulos anteriores.

9.2.1 Etapa cero: recolección de data

El estudio realizó múltiples encuestas y conteos de tráfico con el motivo de disponer de suficiente información con la que construir los modelos de las etapas siguientes. Entre la data recaba se tienen encuestas de frecuencia viaje, de velocidad de viaje, así como conteos de aforo vehicular en líneas cortina o líneas cordón. Lo más importante de estos datos proviene de las encuestas de viaje, pues de ellas se obtienen los parámetros para hallar los ratios de viaje en la primera etapa de generación de viajes. El método de muestreo se realizó buscando que las zonas sean homogéneas en cuanto al nivel socioeconómico; así, en total se encuestaron alrededor de 22000 hogares.

En cuanto a los aforos de línea cordón y línea cortina, estos se realizaron para obtener data para la calibración de las etapas de distribución y asignación (ver Figura 9.3).

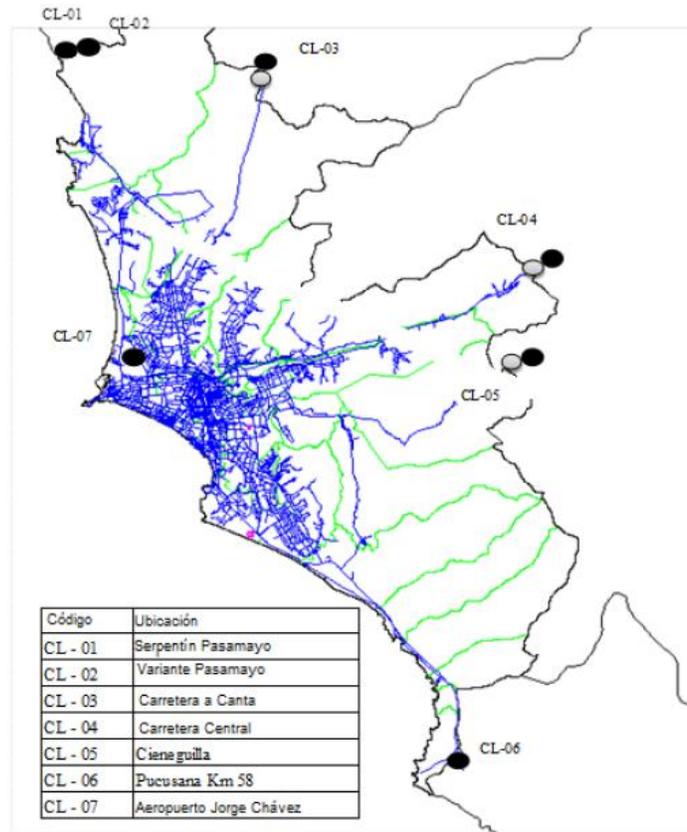


Fig. 9.3 Puntos de conteo en línea cordón en el borde del área de Lima .
Fuente: (JICA, 2012)

Finalmente, la zonificación establecida en el área de estudio consideró 427 zonas, mientras que la red vial se compuso de 14000 enlaces y 8600 nodos, los cuales se representaron en el software TRANSCAD, dado que la data antigua disponible se encontraba en este software.

9.2.2 Generación de viajes

El modelo de generación de viajes del estudio consistió en un análisis de regresión lineal múltiple, considerando tres categorías de viajes: viajes de trabajo basados en el hogar, viajes de estudio basados en el hogar y viajes no basados en el hogar. Esta clasificación revela que se ha usado el esquema clásico de división entre viajes obligados (ej. trabajo, estudio) y discretos (no basado en el hogar), lo cual viene siendo cuestionado, ya que los viajes discretos pueden llegar a tener una recurrencia importante, y en ese sentido analizados con igual importancia que el resto (Herce, 2009). Como dato adicional, del análisis de la data de encuestas de viaje en las 427

zonas de análisis se obtuvo que en promedio, la tasa de viajes en Lima era de 2.4 viajes por persona/día.

Cabe resaltar que la aplicación del modelo de generación, y del resto de etapas no se desarrolló en las 427 zonas establecidas en la etapa cero, pues en ellas solo se procedió al análisis y procesamiento de la data recolectada en campo; para la modelación, en cambio, se emplearon un 14 zonas integradas (ver Figura 9.4). Finalmente, se muestra en el gráfico de la Figura 9.5 el producto final de esta etapa, donde las barras azules representan los viajes generados en cada zona, y las barras rojas, los viajes atraídos.

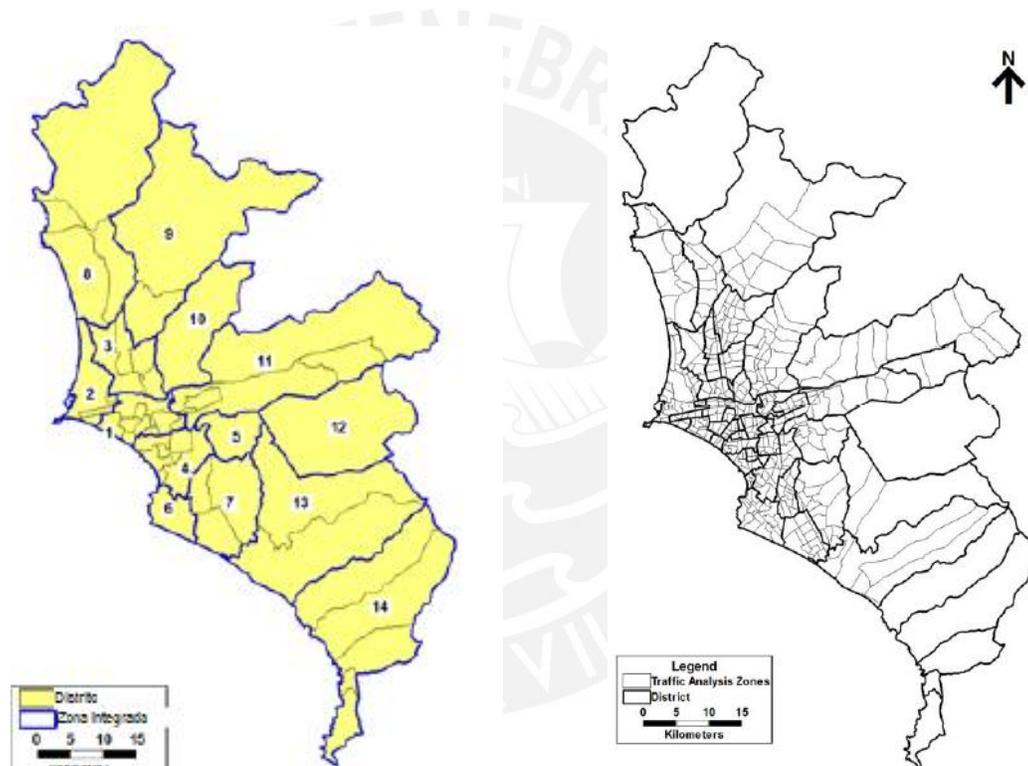


Fig. 9.4 Comparación entre las 14 zonas integradas del modelo del estudio y las 427 zonas de análisis de data. *Fuente: (JICA, 2012)*

9.2.3 Distribución de viajes

El modelo de distribución de viajes consistió en un modelo clásico gravitacional, considerando como factor de impedancia de viajes, a una función decreciente de costo, tal como se revisó en 6.3.1. Luego de aplicar el modelo en las 14 zonas integradas, se obtuvo el siguiente gráfico, donde las barras representan las líneas de deseo de viajes entre zonas. Se observa que la zona 1 es la más concentrada, por conectar con la

mayoría de zonas; además, es posible comparar los resultados de este gráfico con los de la etapa de generación de viajes (Figura 9.5).

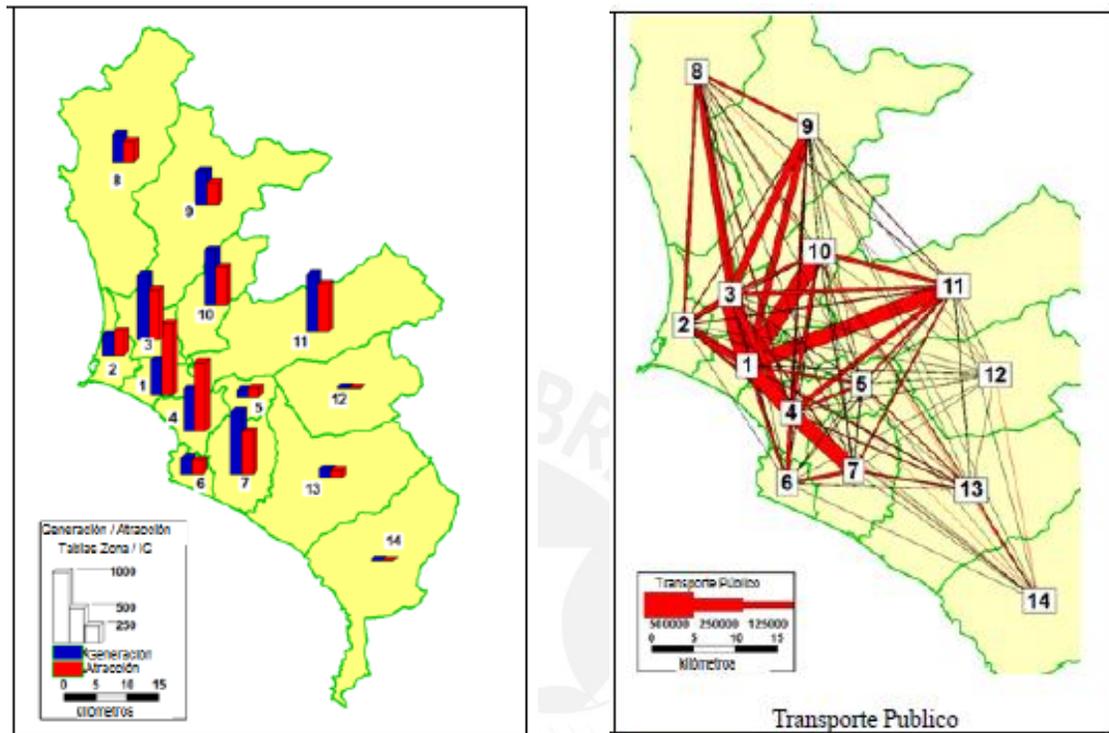


Fig. 9.5 Resultados de las etapas de generación de viajes y distribución de viajes.

Fuente: (JICA, 2012)

9.2.4 Partición modal

El estudio revela que se empleó un modelo probabilístico con distribución Logit binario considerando solo dos modos en conjunto: transporte privado y transporte público. El hecho de haber simplificado la cantidad de modos se debe a las características agregadas del estudio, el cual, pese a recoger data que muestra un uso relevante de otros modos como la bicicleta o la caminata, no puede procesarlos en el modelo empleado (ver Tabla 9.1). Si bien la tabla parece indicar que la bicicleta es un modo que casi nadie usa (0.3%), este bajo valor se puede explicar considerando que las encuestas de viaje no recogen viajes de corta distancia; además, en los conteos de aforos se priorizan el paso de automóviles.

Tabla 9.1 Partición modal obtenida de la data recogida en campo.
Fuente: (JICA, 2012)

Mode	2012	
	N° de Viajes (000)	Modo Compartido
Caminar	5,416	24.3%
Bicicleta	77	0.3%
Motocicleta	107	0.5%
Auto Privado	3,401	15.2%
Mototaxi	1,325	5.9%
Taxi	591	2.6%
Colectivo	333	1.5%
Combi	3,880	17.4%
Microbús	5,536	24.8%
Bus	1,248	5.6%
BRT	274	1.2%
Tren	74	0.3%
Camión y Otros	44	0.2%
Total	22,308	100.0%

9.2.5 Asignación de viajes

Finalmente, la etapa de asignación de viajes siguió el modelo más tradicional de equilibrio del usuario (EU), el cual se basa en el primer principio de Wardrop. Lamentablemente, el estudio no menciona cuáles fueron las relaciones flujo-costo consideradas en el cálculo del costo de transitar por cada ruta. Tampoco se conoce si se tuvo que realizar métodos de ajuste luego de calibrar el modelo con los aforos vehiculares obtenidos en la etapa cero.

9.3 TÁRYET: Diseño operacional de los Corredores Complementarios

El presente subcapítulo muestra los procedimientos del modelo de transporte empleado en el estudio *“Definición de un diseño operacional preliminar para los corredores complementarios definidos por Protransporte”* (Táryet, 2013), elaborado por la consultora TÁRYET para la Municipalidad Metropolitana de Lima. A diferencia del estudio anterior, los objetivos del estudio son más específicos y consisten en planificar rutas de transporte público en corredores de buses preestablecidos (Figura 9.6). Por ello, la naturaleza del estudio permite observar que la mayoría de procesos elaborados se vinculan a la etapa de asignación de viajes.



Fig. 9.6 Los cinco corredores complementarios de Lima. *Fuente: Google Earth*

A continuación se analizan los procesos elaborados por etapas desde una perspectiva de la metodología planteada por el esquema de cuatro etapas.

9.3.1 Recolección de data

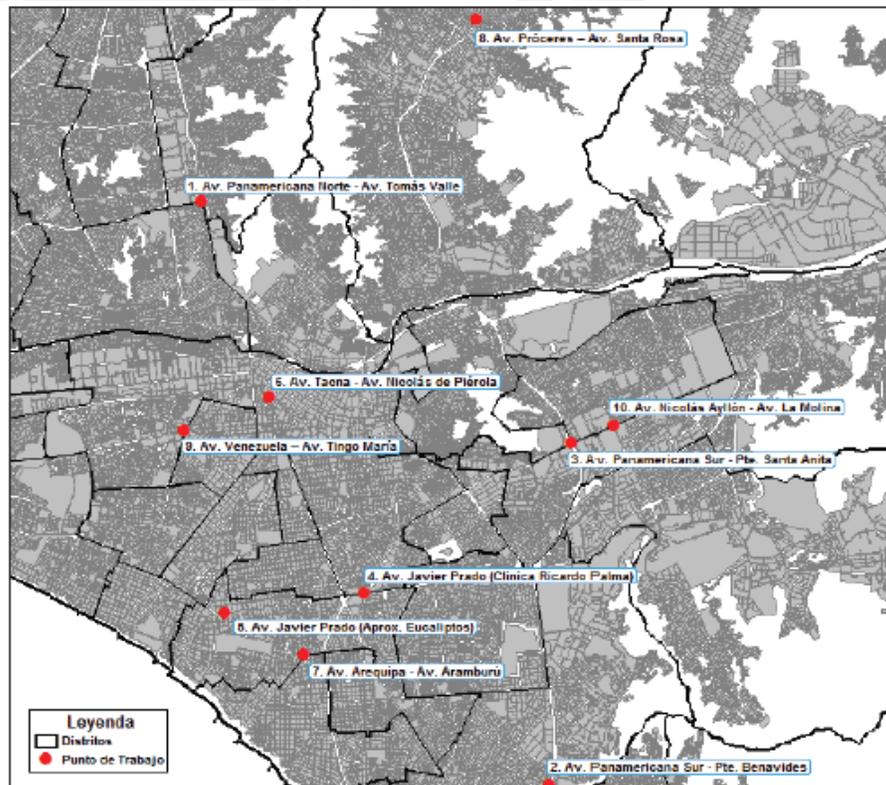


Fig. 9.7 Puntos de recolección de datos en algunos puntos de los ejes de los corredores. *Fuente: (Táryet, 2013)*

La información recolectada en campo estuvo relacionada con la construcción del modelo de asignación de viajes, así como su calibración. La labor de recolección consistió en realizar aforos vehiculares y de pasajeros en rutas de transporte público, además de medir sus frecuencias de paso. Los puntos elegidos se ubicaron en los ejes de los corredores complementarios, en las intersecciones de avenidas importantes (ver Figura 9.7). En esta etapa, se resalta la mención del estudio por una ausencia de data más confiable, tanto a nivel agregado como desagregado, sobre los flujos reales de pasajeros en el sistema de transporte público, pues se tiene data procesada solo de los embarques en el Metropolitano y la Línea 1 del Metro. Esto responde al funcionamiento real del conjunto de rutas, el cual no cuenta con un sistema de control de embarque.

En cuanto al sistema de zonificación, se consideraron zonas con una población promedio de 15000 habitantes, considerando que, para los fines de interés en el funcionamiento del transporte público, se incluyesen una estación de metro o de BRT por zona de estudio solo en el centro de la ciudad, a fin de asignar mejor los viajes a las estaciones y controlar las transferencias entre corredores. Esta consideración refleja la validez que se dio a la distribución de viajes en Lima, estimada por JICA, la cual halló que la mayoría de viajes llegaba al centro de la ciudad.

Finalmente, el estudio muestra que la red considerada incluyó vías expresas, arteriales y colectoras. La consultora reconoce que tanto el sistema de zonificación y de red elegidos, generan que los resultados finales sean correctos para **viajes de media y larga distancia** (a nivel agregado), y aclara que en vías de orden secundario (donde recorren gran parte de las rutas alimentadoras), los flujos de viajes estimados podrían ser menores a los reales, debido a que no se puede observar la demanda de viajes cortos, dada la agregación del estudio.

9.3.2 Obtención de la matriz de viajes

Como se previno al inicio del subcapítulo, el estudio efectuado por Táryet no realizó modelos de generación ni de distribución de viajes, para elaborar su matriz de viajes. La matriz que se utilizó devino de una actualización al 2013 por interpolación de la matriz calculada por JICA para los años base de 2009 y 2015. Tomando en cuenta que la matriz inicial se determinó usando 14 zonas integradas para todo Lima (JICA, 2012), fue necesario desagregar estas y añadir nuevas zonas). Esto se debió a la necesidad de contar con información detallada de los flujos de viajes en los ejes de los

corredores, considerando que se necesitan establecer rutas troncales y alimentadores. En la Tabla 9.2, se muestran los viajes obtenidos por hora del día, y por modos de la matriz resultante. Como se observa en la tabla, las matrices obtenidas se dividieron en dos clases: de transporte privado (segregando por modos) y público (una sola clase).

Tabla 9.2 Resumen de la matriz resultante empleada, dividida por modos y horas del día. *Fuente: (Táryet, 2013)*

Matriz	Viajes HPM	Viajes HPT	Viajes HV
Auto particular	187,038	106,891	82,557
Taxi	116,307	105,396	88,860
Vehículos pesados	14,052	10,776	10,369
Transporte público	1,026,716	697,980	481,503

9.3.3 Asignación de viajes

La asignación de viajes representa la etapa principal del estudio, puesto que su objetivo es la obtención de flujos y rutas a detalle en los ejes de los corredores. A continuación se mencionan los procesos elaborados más relevantes en esta etapa

El modelo de asignación elegido fue el del equilibrio del usuario o de Wardrop, en el cual se debe cumplir que, en el equilibrio obtenido, ningún viajero puede reducir su costo generalizado de viaje al cambiar de ruta. Para hallar los costos asociados a cada enlace, se recurrió a las funciones de costo-flujo, tal como se revisó en 7.1. La función de costo elegida para el estudio se muestra a continuación (Ec 9.1).

$$T = L * \left[t_0 + a * \left[\frac{Q}{c} \right]^b \right] \quad (9.1)$$

De 9.1, T es el costo asumido para un determinado enlace (en unidades de tiempo), el cual depende de la longitud del enlace (L), el tiempo a flujo libre (t_0), la capacidad de la vía por carril (c) y el flujo observado (Q). Por último, los valores a y b corresponden a parámetros de ajuste, los que se hallan en la calibración.

El procedimiento de asignación se realizó mediante un algoritmo iterativo hasta lograr el escenario de equilibrio de Wardrop. En la calibración del modelo, se ajustó la matriz inicial, pues esta no coincidía con los datos de aforo obtenidos, siguiendo un método

de ajuste mediante el software TRANSCAD. Posteriormente, la nueva matriz de transporte privado (por modos) se asignó a la red, obteniendo los flujos y tiempos de viajes en los enlaces. Como el estudio requiere flujos de transporte público, se estimaron los tiempos de viaje en transporte público a partir de los obtenidos en el transporte privado, usando factores de conversión (ver Tabla 9.3).

Tabla 9.3 Velocidad del transporte público como función de la del transporte privado. *Fuente: (Táryet, 2013)*

Código	Tipo	Función
1	Vías arteriales	$V_{pub}=0.5719*V_{prv}$
2	Vías colectoras	$V_{pub}=0.5469*V_{prv}$
3-4	Vías expresas	$V_{pub}=0.6000*V_{prv}$
5	Vía locales	$V_{pub}=0.5200*V_{prv}$

Finalmente, se volvió a iniciar el proceso de asignación mediante el software TRANSCAD, teniendo como datos de entrada la matriz de transporte público, los tiempos de viaje promedios en este modo, así como parámetros de diseño de transporte público, como las frecuencias de viaje, el sistema de tarifas y factores de penalización por transferencias. Así, se lograron obtener los flujos de viajes resultantes en cada corredor y en sus respectivas rutas troncales y alimentadores (ver Figura 9.8 y Tabla 9.4).

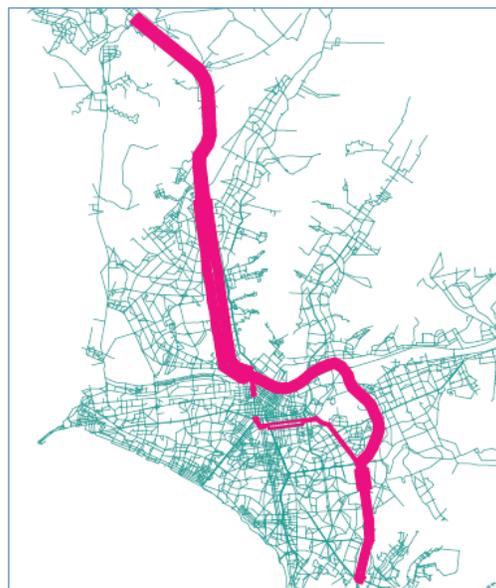


Fig. 9.8 Corredor complementario Panamericana. *Fuente: (Táryet, 2013)*

Tabla 9.4 Flujos de viajes resultantes para los distintos servicios troncales en el corredor Panamericana. *Fuente: (Táryet, 2013)*

<i>Servicio</i>	<i>Longitud (km I+V)</i>	<i>Frecuencia máx. (veh/hora)</i>	<i>Flota</i>	<i>Pasajeros / Día</i>	<i>Veh-km / Día</i>	<i>Tipo Vehículo</i>
101	93.6	18	96.1	108,028	23,122	18 m
102	51.4	11	25.5	25,977	5,972	12 m
103	32.5	18	52.0	46,020	8,084	12 m
104	27.0	13	20.5	21,859	3,413	12 m
105	51.4	11	25.5	25,977	5,972	12 m
106	27.6	10	23.5	26,655	3,238	12 m
107	55.9	16	50.1	48,305	13,415	12 m

9.4 Alcance de los estudios

A continuación, se presenta un análisis del alcance de ambos estudios como herramientas de planificación del transporte urbano, considerando el enfoque de movilidad sostenible, en contraposición con el modelo tradicional de demanda.

9.4.1 Plan Maestro de JICA

El plan maestro de transporte elaborado por JICA en 2012, muestra un clásico estudio de modelación de cuatro etapas, cuyos procedimientos se describieron en 9.2. Más allá de los métodos de recolección de data o de construcción de los modelos en cada etapa, cuya técnica de modelación no es de discusión, es más relevante preguntarse sobre los resultados y recomendaciones posteriores del estudio, pues estos han servido de guía en la programación de proyectos de inversión para el transporte urbano de la ciudad. Por ello, se analizan a continuación las principales conclusiones y resultados del estudio, tomando en cuenta si estas plantearon una alternativa de solución con un enfoque sostenible.

En la parte final del estudio, se emite un pronóstico final sobre la demanda futura de movilidad en la ciudad, teniendo como parámetro de análisis la partición modal futura (Tabla 9.5).

Tabla 9.5 Partición modal estimada al 2020 y 2030. Fuente: (JICA, 2012)

Año	Publico	Privado	Total	Publico	Privado
2012	999,972	303,114	1,303,086	76.7%	23.3%
2020	1,090,237	346,943	1,437,180	75.9%	24.1%
2030	1,215,816	390,897	1,606,713	75.7%	24.3%
Evolución 20-12	9.0%	14.5%	10.3%		
Evolución 30-20	11.5%	12.7%	11.8%		

En la tabla se señala que la partición modal del vehículo particular se incrementará en desmedro del transporte público, tal como se especifica en las observaciones: *“el modo privado aumenta su participación en el reparto modal, a causa del fuerte aumento de la tasa de motorización y las inversiones previstas en la red de carreteras”* (JICA, 2012). De esta manera, se hace claro que el estudio no contempla la posibilidad de una actuación, desde la planificación, en el sistema de actividades de las personas, sino que solo estima su replicación, como ocurre con el incremento en la tasa de motorización, producto del uso de factores de crecimiento. Además, es inevitable el aumento del modo privado, cuando se reconoce que este responde a las inversiones en infraestructura vial. Es paradójico el hecho de que el pronóstico inicial estime situaciones desfavorables al tráfico de la ciudad, tomando como una de las causas la posterior solución al problema. Como se especifica en una de las conclusiones: *“El congestionamiento de vías principales en horas pico serán más pesados. Por lo tanto, las construcciones de proyectos viales propuestos en PMTU-2025 son necesarias; particularmente, la implementación de Vía de Periférica, Av. Paseo de la República Sur, y Autopista Ramiro Prialé, son muy importantes”* (JICA, 2012).

Así, es verificable que el enfoque empleado en el estudio, plantea como soluciones las causas reconocidas del problema. Basándose en los términos del estudio, la situación se torna cíclica cuando el aumento de la capacidad en proyectos viales importantes promueve el continuo aumento de la tasa de motorización, lo que a su vez hace crecer el reparto modal privado, incrementando finalmente el congestionamiento de las vías principales en hora pico.

Finalmente, resalta el hecho que el enfoque del plan maestro considere la partición modal solo como una herramienta de diagnóstico y no como uno de los objetivos del planteamiento de recomendaciones finales, a diferencia de un enfoque de movilidad sostenible. Como ejemplo, se puede mencionar la política de reducción del reparto modal privado como objetivo dentro del plan de movilidad urbana de la ciudad de Dresden en Alemania (GIZ, 2014).

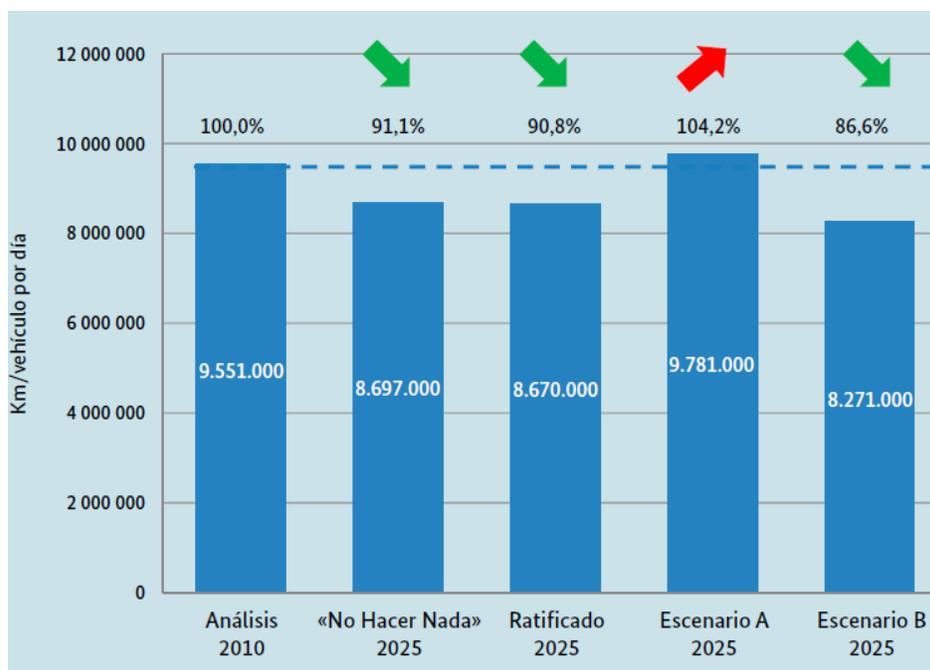


Fig. 9.9 Comparación entre escenarios futuros de demanda, de acuerdo al enfoque de movilidad elegido. *Fuente: (GIZ, 2014)*

En esta ciudad, el porcentaje de viajes en modo privado se había casi duplicado de 27% a 48% en 20 años, por lo cual, se identificaron diferentes escenarios posibles a futuro (Figura 9.9). Del gráfico, se puede notar que el Escenario A, que planteó mayor infraestructura vial guiado por el modelo tradicional, muestra un crecimiento en el flujo global de vehículos, lo que se traduce en mayor congestión. Con el Escenario B, en cambio, donde se incluyen medidas de promoción de modos no motorizados y transporte público, o de pacificación de tránsito, se obtiene una demanda menor, la cual es la que se recomienda.

9.4.2 Diseño operacional de TÁRYET

Tal como se desarrolló en 9.3, el estudio realizado por TÁRYET no representa una herramienta de planificación a nivel global, pues no tiene como objetivo la prognosis de la demanda total futura en toda la red, sino solo la del modo de transporte público en ciertos ejes establecidos. No obstante, al igual que el estudio anterior, ambos mantienen el mismo enfoque de modelación de la demanda en el desarrollo de sus etapas. Dos ejemplos de ello son la forma como fue obtenida la matriz de viajes y la utilización de factores de conversión en las velocidades de operación del transporte público.

Por un lado, como se pudo ver en la sección 9.3, la matriz de viajes fue obtenida por interpolación de la matriz de 2009 con la estimada de 2015, presumiblemente ambas obtenidas por JICA. Esta consideración limita cualquier intento por establecer un enfoque más sostenible en el estudio, puesto que, estas matrices interpoladas son el resultado de un enfoque que subestima el dinamismo de las actividades en la ciudad al asumir que el comportamiento de los viajes es constante a lo largo del tiempo. Como se ha revisado en el Capítulo 5, la estabilidad de las matrices es baja, más aún cuando no se integran planes o actuaciones urbanísticas futuras, que pueden cambiar los patrones de viajes; esto se vislumbra en proyectos como centros comerciales o grandes condominios residenciales, los que actúan de importantes focos de atracción de viajes. Asimismo, la consideración de una estabilidad de los patrones en el mediano plazo puede impedir se planifique con el objetivo de lograr mayor compacidad urbana en la ciudad, tal como lo propone una visión de movilidad sostenible, y cuyos alcances pueden permitir reducir a largo plazo las distancias y tiempos de viaje promedio.

Por otro lado, cabe recordar la utilización de factores de conversión para obtener las velocidades de transporte público en función de la velocidad del modo privado para distintos tipos de vía, a los que se vincula con diversas intensidades de flujo (Tabla 9.3). Si bien este método parece ser razonable, pues busca reflejar la realidad actual, nuevamente se revela a la partición modal como una herramienta de análisis y no de planificación con objetivos condicionantes en el estudio. Esto ocurre, porque se asume que la velocidad de viaje de transporte público, el cual es el principal componente de utilidad del modo, subyace a la del modo privado y no puede ser superior a este. Sin embargo, bajo un enfoque de movilidad sostenible, se pueden buscar alternativas (ej. corredores segregados) donde se establezcan velocidades operacionales del transporte público mayores a la del privado, lo cual tiene como finalidad principal incrementar la utilidad racional del modo, afectando directamente la partición modal resultante.

CAPÍTULO 10 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En este capítulo final, se desarrollan las principales conclusiones y comentarios sobre el análisis efectuado a la metodología clásica del modelo de planificación del transporte a través de sus cuatro etapas y a la relación del enfoque intrínseco que presenta este modelo con el nuevo enfoque de movilidad sostenible, el cual es seguido por muchas ciudades en el mundo actualmente.

10.1 Conclusiones

La única hipótesis inicial del trabajo de tesis fue la posible incompatibilidad de los criterios del modelo tradicional con aquellos correspondientes a un enfoque sostenible. En base a ello, se establecieron tres objetivos específicos. Los dos primeros consistieron en desarrollar los procedimientos del modelo de cuatro etapas, y analizar estos desde un enfoque de movilidad sostenible, a fin de evaluar las ventajas de un modelo adaptado a dichos criterios. El último objetivo, en cambio, buscó integrar los dos objetivos anteriores al analizar tanto los procesos que construyeron dos modelos de planificación para Lima, así como el enfoque (tradicional o sostenible) que siguieron.

En cuanto al primer objetivo, se desarrolló el método tradicional de planificación de transporte esquematizado en cuatro etapas, lo cual permitió conocer a profundidad los modelos internos de cada etapa, y las ventajas y desventajas de la construcción de estos. En ese sentido, se ha verificado que el método tradicional en sí mismo no está exento de limitaciones intrínsecas, relacionadas principalmente al aspecto determinístico del modelo, vinculado con los procedimientos matemáticos que incluye cada etapa. Así, por ejemplo, en la etapa de generación de viajes, se observó que la no continuidad temporal de los valores de ratio de viaje genera alta variabilidad en los flujos generados o atraídos obtenidos, pues estos dependen de los motivos que generan la movilidad de las personas lo cual siempre es difícil de modelar. En la etapa de distribución de viajes, se verificó que la función decreciente de costo de viaje (f_{ij}), la cual condiciona el contenido de las celdas de la matriz de viajes, no dispone de un método de calibración determinístico, pues hay valores inherentes en las ecuaciones sujetas a criterio del modelador, lo que constituye una desventaja en el modelo desde la perspectiva de imparcialidad que deben tener los estudios de demanda. La etapa de partición modal, por su parte, presenta limitaciones dada su complejidad tomando en cuenta la diversidad de modos a considerar y que su modelo debe responder a la

elección de cada individuo; para ello, se han elaborado diferentes distribuciones probabilísticas, las cuales arrojan diversos resultados según el nivel de data que se tenga disponible. Por último, las limitaciones de los modelos de la etapa de asignación de viajes están también vinculadas a la elección discreta de cada individuo, y se relacionan con el factor subjetivo de la elección de ruta como el desconocimiento de la red, la preferencia por rutas conocidas y la aparición aleatoria de la congestión. Cabe resaltar que la teoría principal de estos modelos fue preparada para una asignación solo de automóviles, si bien actualmente es posible adaptarla para el transporte público u otros modos.

A continuación, se desarrolló el segundo objetivo relacionado al análisis de los criterios del enfoque de movilidad sostenible. Como se recuerda, el concepto de movilidad urbana sostenible se define desde sus tres ejes de desarrollo: ambiental, energético y social. El primero, está vinculado a la reducción de emisiones contaminantes (ej. CO_x, NO_x); el segundo, relacionado con la promoción de modos de bajo consumo energético y la gestión del uso del suelo, como medidas de eficiencia energética en la movilidad. Por último se encuentra el componente social, que involucra la comprensión de la movilidad urbana como derecho de todas las personas, lo cual deriva en el reconocimiento del espacio público destinado a todas las necesidades de movilidad y en la inclusión de medidas que garanticen una accesibilidad universal del sistema de transporte.

En base a los criterios básicos del enfoque de movilidad sostenible, se identificaron ciertas incompatibilidades en los procesos seguidos en el modelo tradicional de cuatro etapas con aquellos criterios sostenibles, resaltándose los siguientes aspectos. En primer lugar, se verificó que la construcción de las matrices de viajes priorizan los viajes interzonales sobre los intrazonales, al contener la diagonal matricial vacía; esta consideración, justificada tradicionalmente por razones de simplicidad en la calibración impide que se disponga de información de flujos de viajes de corta distancia, como ocurre con los viajes a pie o en bicicleta. Por otro lado, se observó que el enfoque clásico subestima cualquier actuación en la gestión del uso del suelo, dado que la obtención de matrices futuras se da por medio de factores de crecimiento que simplemente replican el comportamiento de la movilidad de las personas, lo cual no representa un escenario real. Por último, se ha notado que en el modelo de cuatro etapas, se puede dar prioridad a ciertos modos sobre otros; en particular esto ocurre

con el modo de vehículo particular. En la etapa de partición modal, por ejemplo, la determinación de la utilidad asociada a cada modo es subjetiva, y por lo general esta es mayor en el modo privado, de manera que implícitamente se establece un orden de prioridad de modos durante la planificación. Esto ocurre también en la etapa de asignación de viajes, donde el proceso de elección de ruta más corta (en términos de costo generalizado de viaje) puede derivar en la justificación de la política de infraestructura vial de mayor capacidad, al representar esta una respuesta al descubrimiento de una ruta más “eficiente”. De esta manera, la hipótesis inicial quedó demostrada y sustentada por las razones expuestas.

El tercer objetivo estuvo relacionado a la posibilidad de un proceso de adaptación de la estructura de la metodología clásica a un nuevo enfoque vinculado al desarrollo sostenible en el transporte. Se ha revisado que actualmente los enfoques de un modelo de movilidad sostenible se pueden aplicar a los planes de planificación de transporte urbano; un ejemplo de esto son la existencia de los nuevos planes de movilidad urbana sostenible (PMUS), los cuales respaldan el reemplazo de un enfoque de demanda por uno donde se desarrollen todos los modos de movilidad, según la necesidad de movilidad. A diferencia de los planes con un enfoque tradicional, los PMUS incluyen parámetros de eficiencia desligados de las condiciones del tráfico, tales como una partición modal objetivo, niveles altos accesibilidad en el sistema o una reducción de emisiones vinculada a la movilidad urbana. En resumen, los PMUS entienden la planificación del sistema de transporte no como respuesta ante el sistema de actividades establecido (enfoque tradicional de demanda), sino como un condicionante de la movilidad (enfoque de oferta) (ver Figura 10.1). De la imagen, se deduce que a partir de un sistema de infraestructura de transporte se modifica el comportamiento de viajes en la urbe (actividades) y no al revés como ocurre en el enfoque de demanda.



Fig. 10.1 Enfoque de oferta, aquel que incluye los principios de movilidad sostenible. *Fuente: (Herce, 2009)*

En ese sentido, el análisis de los procesos de modelación en dos estudios (un plan maestro y un plan operacional) para la ciudad de Lima permite integrar los dos elementos principales de análisis previos: la estructura clásica de modelación del

transporte y los criterios del enfoque de movilidad sostenible adaptables a esta estructura. Como se desarrolló extensamente en el capítulo 9, ambos estudios habrían seguido un modelo tradicional de modelación, ignorando criterios sostenibles a lo largo de las etapas y subetapas de este modelo, tal y como proponen los nuevos planes (PMUS).

El caso del plan maestro, realizado por JICA en 2012 es particular, pues constituye un estudio tradicional completo que inicia con la recolección de diversas clases de data (muestreo de población y aforos) y prosigue con el desarrollo de los modelos de las cuatro etapas siguientes. Se verificó la ausencia de un enfoque que busque modificar el reparto modal actual en favor del transporte público a nivel agregado para el modo motorizado o que incluya data sobre el uso de modos no motorizados a fin de efectuar lineamientos en el plan. Al final, se logra verificar que la propuesta final del estudio está basada en la creación de más infraestructura para el modo privado y para el transporte público (líneas de metro), obteniéndose una reducción de reparto en el uso de transporte público. Esto se debe a que el estudio estima una demanda creciente del modo privado que “justifica” la proyección de más infraestructura vial (ej. intercambios viales), lo cual genera un círculo vicioso que reduce finalmente el porcentaje proyectado del modo de transporte público.

Por su parte, el caso del plan operacional de los corredores complementarios realizado por TÁRYET permite observar las limitaciones internas de la estructura del método clásico. Por un lado, el estudio, cuyo principal objetivo es la aplicación de un modelo de asignación de viajes, obtiene la matriz de viajes en base a una interpolación de una matriz de un estudio anterior, lo cual es cuestionable, pues se ignora o subestima el dinamismo del sistema de actividades. Por otro lado, otra limitación encontrada y que estaba vinculada con la estructura del método es la utilización de macrozonas de análisis. El uso de zonas grandes no permite hacer un análisis detallado sobre los desplazamientos de corta distancia, donde se favorecen los viajes a pie o bicicleta. En ese sentido, si bien el objetivo del estudio es estimar la demanda de viajes en corredores de transporte público, desde la perspectiva de la intermodalidad como principio sostenible, hubiese sido beneficioso obtener estimaciones sobre la demanda en modos no motorizados. Cabe resaltar que en el estudio se reconoce la desventaja del nivel de agregación del mismo, al anotar que la demanda resultante puede ser menor a la real.

10.2 Comentarios

En suma, se ha estudiado la estructura del modelo clásico de cuatro etapas, el cual presenta una incompatibilidad intrínseca del modelo con criterios de movilidad sostenible, como se ha verificado en dos estudios de demanda para la ciudad de Lima. A partir de este análisis, es factible comentar acerca de dos factores relacionados que actúan de limitación frente a la apuesta por aplicar criterios de movilidad sostenible a los planes de transporte urbano; estos factores son el costo y la precisión del estudio.

Por un lado, si se desea apostar por un modelo de planificación adaptado a un enfoque sostenible, es preciso contar con un nivel de organización con alta disponibilidad presupuestal y calidad técnica en las autoridades públicas de transporte correspondientes. De esta manera, se pueden afrontar los nuevos requerimientos en la realización de los estudios de planificación, los cuales están vinculados con el segundo factor que es la precisión. Se ha visto que aplicar criterios sostenibles requiere obtener data a un nivel de desagregación alta, lo cual por ejemplo puede implicar obtener ratios de viaje a nivel de individuos, reducir el tamaño de las zonas de estudio o analizar matrices con una diagonal llena para desplazamientos en modos no motorizados. A todo ello, se debe considerar la aparición de modelos matemáticos más complejos para cada etapa del estudio.

En ese sentido, se hace visible nuevamente el dilema entre costo y precisión, tal como se mencionó en 3.1.1 en relación con la elección del tipo de muestreo de data, aunque ahora vinculado a la apuesta por un enfoque sostenible en los esquemas de planificación del transporte urbano. El presente trabajo de tesis ha descrito los beneficios de optar por un enfoque sostenible en contraposición con un enfoque tradicional basado en el automóvil. Sin embargo, también se ha analizado la consistencia de un modelo de transporte, que si bien carece de un enfoque sostenible, constituye una herramienta útil y adaptable a los nuevos criterios de sostenibilidad. Por tanto, lo conveniente sería apostar por una inversión alta en la elaboración de los modelos de transporte, a fin de que la data recolectada sea más precisa (desagregada) y los resultados más fiables. Por ejemplo, en muchas ciudades existen observatorios de la movilidad, cuya función es realizar amplios estudios de recolección de data, y desarrollar las etapas iniciales como la generación y distribución de viajes, con el fin de obtener matrices actualizadas constantemente. De esta manera, solo el compromiso

por abordar las limitaciones previamente abordadas, constituyen una de las fases más importantes en el alcance futuro de un modelo óptimo de planificación del transporte.



REFERENCIAS

Bielich, C. (2009). La guerra del centavo: una mirada actual al transporte público en Lima Metropolitana. Lima: Instituto de Estudios Peruanos.

Bonsall, P. (1992). The influence of route guidance advice route choice in urban networks. *Transportation* Vol.19 (1), 1-23.

Buchanan, C. (1964). *Traffic in towns*. Reino Unido: Penguin Books.

Cabrera, F. (2015). Material virtual del curso "*Ingeniería de Tráfico*". Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú

Casey, H.J. (1955). Applications to traffic engineering of the law of retail gravitation. *Traffic Quarterly* IX.

CE, Comisión Europea: Dirección General de Movilidad y Transporte (2014). Guía de desarrollo e implementación de planes de movilidad urbana sostenible. Bruselas, Bélgica.

Dextre, J.C y Avellaneda, P. (2014). *Movilidad en zonas urbanas*. Lima: Fondo Editorial PUCP.

GC, Generalitat de Catalunya (2006). Encuesta de movilidad urbana cotidiana de Cataluña. Barcelona, España.

GIZ, Agencia Internacional de Cooperación Alemana (2014). *Planes de Movilidad Urbana: Enfoques Nacionales y Prácticas Locales*. Eschborn, Alemania.

Gutiérrez, L. (2014). *Movilidad Sustentable para Ciudades Competitivas en América Latina*. Presentación en el conversatorio por el 50° Aniversario de la FIEECS-UNI. Lima, Perú.

Herce, M. (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad*. Barcelona: Editorial Reverté

INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (2015). Nota de prensa sobre el día mundial de la población. Lima, Perú

IPDU, Instituto de Planificación y Desarrollo Urbano de Lima (2007). Ordenanza N°341: Sistema Vial Metropolitano de Lima. Municipalidad de Lima

Jansen, G.R.M y Bovy P.H.L (1982). "The effect of zone size and network detail on all-or-nothing and equilibrium assignment outcomes". *Traffic Engineering and Control*, nro 23.

JICA, Agencia de Cooperación Internacional de Japón (2012). Plan maestro urbano para el área de Lima Metropolitana y Callao. Lima: Yachiyo Engineering

Mathew, T. (2008). Transportation Network Design. University of Princeton, Estados Unidos.

Ortúzar, J.D y Willumsen, L (2011). Modelling Transport. Reino Unido: Wiley Ltd

Outram.VE y Thompson.E (1978). Drivers' perceived cost in route choice. *Proc. Sixth PTRC Summer Annual Meeting*. Londres, Inglaterra.

Sanz, A (1997). Movilidad y accesibilidad: un escollo para la sostenibilidad urbana: Boletín Ciudades para un futuro más sostenible.

Stopher, P. y Jones, P. (2001). "Developing standards of transport survey quality". Conferencia internacional sobre calidad de encuestas de transporte e innovación. Sudáfrica. Capítulo 4, pp16.

TÁRYET, Ingeniería de Transporte (2013). Diseño Operacional para la implementación de los corredores complementarios. Lima, Perú.

TAG, Transport Analysis Guidance (2014). Highway Assignment Modelling. Department for Transport (UK Government). Reino Unido.

TRB, Transport Research Board (2000). Highway Capacity Manual. National Research Council. Washington D.C, Estados Unidos.

UC, Pontificia Universidad Católica de Chile (2015). Material virtual del curso "*Análisis de sistemas de transporte*". Web Coursera

UW, University of Washington (2016). Material virtual del curso "*Urban Transportation Planning and Design*". Vía Web.

Wilson,A.G. (1974). "Urban and regional models in geography and planning". Reino Unido: Wiley&Sons

Wilson,A.G. (1970). "Entropy in urban and regional modelling". Pion: Londres