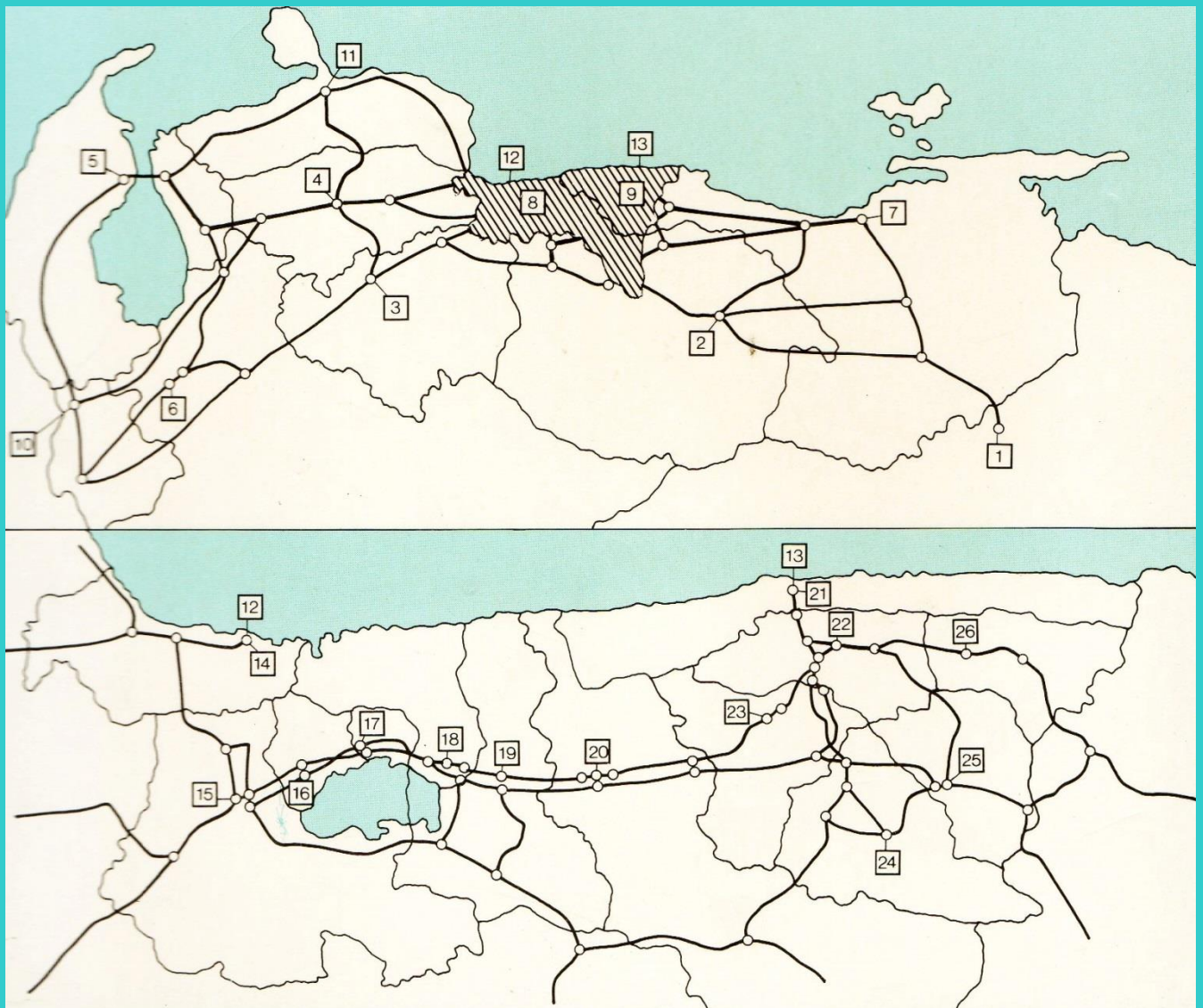


Cambridge Urban and Architectural Studies

Modelación integrada de usos del suelo y transporte

Cadenas de decisión y jerarquías

Tomás de la Barra



MODELACIÓN INTEGRADA DE USOS DEL SUELO Y TRANSPORTE

Cadenas de decisión y jerarquías

TOMÁS DE LA BARRA

Instituto de Urbanismo, Universidad Central de Venezuela

Publicado originalmente en inglés por:

Cambridge University Press

Publicado por primera vez en 1989 y reimpreso en 1995

Copyright Cambridge University Press 1989

ISBN 0-521-24318-1

Traducción al castellano por iniciativa del autor en 2014

Contenido

1	Ciencias sociales y planificación	1
1.1	Ciencias naturales y ciencias sociales: la hipótesis de la convergencia	1
1.2	El método científico	4
1.3	Fenómenos sociales y el conocimiento social objetivo	7
1.4	Científicos sociales y planificadores	9
1.4.1	El científico social	9
1.4.2	El planificador.....	10
1.5	Algunos conceptos básicos sobre modelos	12
1.6	Dinámica de los modelos.....	16
1.7	Conclusiones	19
2	Teorías microeconómicas de los usos del suelo	21
2.1	El estado aislado de Von Thünen	22
2.2	Calculando el modelo básico de von Thünen	25
2.3	Extendiendo el modelo de von Thünen con elasticidades.....	29
2.3.1	Elasticidad de la demanda	29
2.3.2	Elasticidad en el consume de suelo	33
2.4	El modelo de usos del suelo y transporte de Wingo.....	36
2.5	El modelo de localización y usos del suelo de Alonso	39
2.6	Múltiples áreas de mercado: los modelos de Christaller y Lösch	46
2.7	Algunas conclusiones sobre los modelos microeconómicos espaciales	51
3	Modelos de interacción espacial	53
3.1	Orígenes y desarrollo de los modelos de interacción espacial	53
3.2	Conceptos básicos	54
3.3	La derivación por maximización de la entropía	55
3.4	Algunas formas específicas de modelos de interacción espacial.....	60
3.4.1	Modelos de flujos	60
3.4.2	Modelos de localización de actividades.....	61
3.5	Comparación entre los modelos micro-económicos y los de interacción espacial.....	65
3.5.1	Aspectos teóricos	66
3.5.2	Aspectos matemáticos y operativos	67
4	Teoría de utilidad aleatoria y modelos discretos de escogencia.....	71
4.1	Teoría de decisiones: el caso individual.....	72
4.2	Teoría de decisiones: el caso agregado	73
4.3	Algunas propiedades de los modelos discretos de decisiones	79
4.4	Cadenas de decisiones	86

4.5	Costos variables y elasticidades	88
4.6	Jerarquías	89
5	Modelos de contabilidad espacial	91
5.1	Teoría de la producción y el multiplicador	91
5.2	Teoría del ingreso regional y el método de la base económica	96
5.3	El modelo input-output	98
5.3.1	El modelo input-output de región única	98
5.3.2	El modelo input-output multiregional	101
5.3.3	Consideración finales acerca de los modelos input-output	103
5.4	Un modelo de insumo-producto multiregional basado en teoría de utilidad aleatoria	104
5.4.1	El modelo general	104
5.4.2	Acumulación de precios en la cadena de producción: precios normales	107
5.4.3	Acumulación de precios en la cadena de producción: precios de equilibrio	109
5.4.4	Elasticidad de la demanda y sustituciones en la cadena de producción	111
5.5	Conclusiones	112
6	Localización de actividades en ciudades y regiones	113
6.1	Dinámica urbano-regional	113
6.2	El sistema de actividades	115
6.3	La relación dinámica entre la oferta de espacio construido y el sistema de actividades	119
6.3.1	Demanda de espacio construido	120
6.3.2	Oferta de espacio construido	120
6.4	Migraciones regionales	125
6.5	Jerarquías espaciales	127
6.6	Conclusiones	127
7	El sistema de transporte	129
7.1	El modelo <i>enlazado</i> de usos del suelo y transporte	130
7.2	El modelo integrado de usos del suelo y transporte	132
7.3	Análisis de redes para los sistemas de transporte	135
7.3.1	Construcción de pasos	138
7.3.2	Estimación de los costos de viaje	139
7.3.3	Representación del transporte público	140
7.3.4	Prohibiciones de giro	140
7.3.5	Búsqueda multi-pasos	144
7.4	Restricción de capacidad	144
7.5	Generación de viajes	145
7.6	Reparto modal	147

7.7	Asignación a rutas	148
7.7.1	Asignación a paso único	149
7.7.2	Asignación incremental	149
7.7.3	Asignación por equilibrio.....	150
7.7.4	Selección probabilística de pasos	152
7.8	Costos compuestos y el excedente al consumidor	156
7.9	Conclusiones	157
8	Aplicación de TRANUS, un modelo integrado de usos del suelo y transporte.....	159
8.1	Breve descripción del sistema TRANUS	159
8.1.1	Estructura general del modelo	160
8.1.2	Cálculos en el modelo de actividades y usos del suelo	161
8.1.3	Cálculos de transporte.....	163
8.1.4	El procedimiento de evaluación	165
8.2	Aplicaciones en planificación urbana	165
8.2.1	Plan de desarrollo de Curaçao	165
8.2.2	El Plan Maestro de La Victoria	167
8.3	Aplicaciones en planificación de transporte urbano	169
8.3.1	Extensión del sistema Metro de Caracas	169
8.4	Aplicaciones de planificación de transporte regional	171
8.4.1	Autopista Caracas-La Guaira.....	171
8.4.2	Ferrocarril Central de Venezuela	172
8.5	Energía en usos del suelo y transporte.....	175
8.5.1	Escenarios alternativos de uso de energía en áreas urbanas	175

Prefacio a la versión en castellano

El origen de este libro viene de mi tesis de doctorado en la Universidad de Cambridge, UK, presentada en 1979. La década de los 70 resultó ser muy interesante para el tema que nos preocupa: culminaron los trabajos de Wilson en Gran Bretaña en 1970, y apareció la importante contribución de McFadden en 1975. En esa época Cambridge era un hervidero de ideas, en permanente comunicación con Leeds y el CES de Londres. Tuve la suerte de participar de estas discusiones y nutrirme de ellas. Los personajes se mantienen vivos en mi memoria: Allan Wilson, Lionel March, Mike Batty, Hugh Williams, Richard Baxter, Ian Williams, y muchos otros. Por supuesto quien fue mi tutor, Marcial Echenique.

En 1975 me trasladé a Venezuela, donde encontré un grupo de apasionados investigadores de alto nivel. La tesis que finalmente presenté en 1979 se nutrió también de este período fecundo. Cuando presenté la tesis, tuve el privilegio que mis examinadores fueron Mike Batty y Lionel March. La tesis era arriesgada, y llevaba un título ambicioso: *Hacia un Marco Teórico para la Modelación Integrada de Usos del Suelo y Transporte*. Para mi sorpresa, fue muy bien recibida, y Lionel March me ofreció la publicación como libro en Cambridge University Press.

Me tardé siete años en presentar el texto final, pero esto me permitió beneficiarme de un importante período de investigación y desarrollo 1980-87 con mi equipo de la Universidad Central de Venezuela. Esto explica por qué el libro difiere de la tesis original de manera importante. El libro fue muy bien recibido por la prensa especializada, con comentarios favorables en las principales revistas. Lo más impresionante para mí fue el comentario de Mike Batty en el 'Book Review' de *Environment and Planning*, que incluyo en la próxima sección.

Veinticinco años después me aboco a la tarea de traducir el libro al castellano. Tengo una buena audiencia en América Latina, de modo que lo debí haber hecho mucho antes. Por un lado pereza, por otro lado no conseguía un editor dispuesto, que ahora no requiero gracias a Internet, pero por otra parte el sueño de escribir no una traducción, sino un edición enteramente nueva. Como escribir este nuevo libro me llevará todavía un tiempo, me decidí a trabajar en esta traducción. No he cambiado nada del libro original, sólo agregue algunas notas. Muchos de los planteamientos teóricos han cambiado, los hemos reformulado, ya estamos en otras líneas de investigación, pero esto deberá esperar el siguiente libro actualizado y extendido. La idea es poner esta traducción a disposición de estudiantes e investigadores. Muchos de mis estudiantes me han solicitado esta versión en castellano, y es principalmente para ellos que está dedicada.

Tomás de la Barra

Mayo 2014

Prefacio a la edición inglesa de Mike Batty¹

Los primeros modelos matemáticos para la simulación de la localización de los usos del suelo y la generación y distribución de tráfico fueron desarrollados originalmente en USA a finales de los 50. Fueron aplicados ampliamente en los 60 y comienzos de los 70, asociados con planes y proyectos a gran escala de planificación urbana y transporte, hasta que cayeron en descrédito. Las agencias de planificación siempre estuvieron preocupadas por su costo, especialmente sus altos requerimientos de información, pero también la confiabilidad de sus predicciones estuvo siempre en duda, así como la efectividad en que articulaban las bases teóricas para explicar la localización y distribución en áreas urbanas. Por supuesto que, en un sentido pragmático, la existencia de estos modelos aportó un importante mecanismo de estructuración para la preparación de planes urbanos y de transporte. Pero cuando, desde la mitad de los 70, el foco de los problemas empezó a cambiar alejándose del tema del crecimiento urbano y más bien enfrentando el problema del estancamiento y regeneración económica, la demanda por tales conceptualizaciones se hizo menos urgente. A pesar de esto, y cuando estamos entrando en los 1990, la rueda gira una vez más, en la medida en que los políticos y los planificadores comienzan a redescubrir el problema cada vez más urgente del transporte, y en la medida que crece la conciencia de que lo que hace falta es una visión comprehensiva y articulada del sistema urbano (Boyce, 1988).

Los modelos en cuestión están articulados alrededor de tres grandes enfoques acerca del sistema urbano. Primero, los usos del suelo son concebidos como actividades tales como empleo y población, el transporte como viajes, y el suelo como superficie construida. En el segundo enfoque la localización y el transporte son modelados por medio de las interacciones espaciales. En el tercer enfoque las relaciones entre actividades se modelan con base en la contabilidad macroeconómica que provee el modelo de insumo-producto. Estas ideas fueron ampliamente explotadas en el desarrollo de modelos urbanos en los 60, especialmente aquellos cuyo linaje se remonta al *Modelo de Metrópolis* de Lowry (1964). Estos modelos trataron el sistema como estático, la *metrópolis instantánea* en los propios términos de Lowry, pero se beneficiaron del desarrollo de métodos consistentes y de técnicas de estimación como la maximización de la entropía.

Probablemente la mayor deficiencia teórica de estos modelos es la dificultad de incorporar algo de las teorías económicas urbanas que se habían desarrollado desde un punto de vista microeconómico. Este tipo de modelos no llega a enfrentarse siquiera con los mecanismos de mercado que gobiernan la demanda y oferta de suelo de diversos tipos, y por lo tanto no llegan a representar fenómenos como renta, densidad, suelo vacante y congestión en los términos familiares de un mercado. Sin embargo, estos temas no han sido descuidados por

¹ **NdT:** Este texto apareció en la sección Revista de Libros (Book Review) de Environment and Planning B, 1990, volumen 17, páginas 487-494. Se trata de la revista científica más importante en el área. Normalmente este tipo de comentarios sobre un libro recién aparecido ocupa uno o dos párrafos. En este caso Mike Batty le dedica cuatro páginas completas, un hecho insólito por lo cual le estoy muy agradecido. Lo incluyo aquí como prefacio, porque me parece que puede ser de gran interés para los lectores, viniendo, además, de una de las máximas autoridades intelectuales en el área de la ciencia urbana. Mike Batty es profesor en el University College London, y director del Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA).

los investigadores urbanos. En los últimos veinte años se han producido importantes avances, particularmente en el desarrollo de vínculos entre las decisiones de los consumidores en los mercados de suelo y transporte que han vinculado la teoría microeconómica a nivel individual con las escogencias discretas características del tipo de modelos que discutimos aquí. Más aún, en este período se han desarrollado modelos que han intentado integrar los usos del suelo y el transporte con mecanismos de equilibrio necesarios para las elecciones de viaje y modo con la localización y el uso del suelo (Putman, 1983). También ha habido incursiones para transformar los modelos estáticos en, al menos, cuasi-dinámicos, y en algunos casos completamente dinámicos al tratar las discontinuidades en la evolución del sistema urbano (Bertuglia et al, 1990).

El libro de de la Barra sobre modelos urbanos fue escrito en gran medida con la perspectiva de los desarrollos de las últimas dos décadas. A diferencia de otras monografías como la mía propia (Batty, 1976) y Wilson (1974), los modelos que él describe dependen intrínsecamente de la síntesis entre decisiones discretas y la teoría de interacción espacial. El autor toma como axiomático que los modelos urbanos deben integrar los usos del suelo con el transporte de manera consistente, y deben incorporar el tipo de mecanismos de equilibrio que se consideran de importancia fundamental en modelación de transporte. Más aún, desde la perspectiva de los 1990, es ahora posible ver la lógica macroeconómica de manera mucho más clara y consistente, y consecuentemente el tratamiento que le da el autor a la estructura de modelación extiende trabajos anteriores, haciendo que su exposición sea clara y convincente. Aunque el libro está escrito de manera tranquila y sin pretensiones, de la Barra logra imponer con fuerza un tema dominante sobre estos modelos. El subtítulo de su libro hace hincapié en '*cadenas de decisiones y jerarquías*' que son los mecanismos clave que permiten la integración del transporte con los usos del suelo, es decir, interacción con localización. Utilizando la teoría de las decisiones discretas de la demanda de transporte, el autor demuestra cómo los modelos pueden representarse como cadenas de decisiones vinculadas entre sí a través de sus estructuras de costos. Estas decisiones también pueden representarse jerárquicamente, de tal manera que la tesis central del libro es que los modelos integrados de usos del suelo y transporte deben representarse, estimarse y resolverse en función de las secuencias impuestas por estas cadenas y jerarquías.

Es importante tener claridad acerca del desarrollo del concepto de cadenas de decisiones, y un ejemplo revela cómo se utiliza para asegurar la integración consistente de varios componentes de modelación. Considérese el caso de un individuo decidiendo su localización residencial. Para tomar la decisión, supongamos que el individuo se basa en el costo percibido del viaje hogar-trabajo. Sin embargo, cuando consideramos a todos los individuos, el conjunto de decisiones puede generar congestión en la red, cambiando así la estructura de costos sobre la cual se había tomado la decisión inicial. Por lo tanto, la estructura de costos debe ser cambiada para reflejar estos nuevos costos 'efectivos' o reales. Para ello debemos recomputar los costos en orden reverso, desde la decisión de cómo viajar hasta la decisión acerca de la localización residencial. Por supuesto hay generalmente muchos más elementos a considerar, incluyendo rutas diferentes, modos, diversos tipos de viaje, monto de los alquileres en diferentes lugares, y así sucesivamente. Todos estos elementos deben ser incorporados en el conjunto de modelos en un orden consistente, y la idea de las cadenas de

decisión lo hace posible al tratar esto en orden jerárquico y en la secuencia correcta. Este es, por lo tanto, el tema básico que se elabora y desarrolla a lo largo del libro.

En el primer capítulo, de la Barra ubica los modelos urbanos en un contexto más amplio, como vehículos para experimentar y desarrollar la teoría apropiada y para realizar la mejor práctica. En síntesis, él esboza una epistemología de la modelación en el contexto de usar estos modelos en planificación y esto sirve de base para los desarrollos sucesivos. En los próximos tres capítulos desarrolla los componentes básicos de la teoría de los modelos, los *bloques de construcción*. Primero delinea la teoría microeconómica urbana en su desarrollo desde el modelo de von Thünen del mercado de tierra agrícola alrededor de un centro de mercado. Muestra cómo, a comienzos de los 60, primero Wingo equilibra el mercado a través de la reconciliación entre demanda y oferta, y luego cómo Alonso lleva el modelo hasta sus últimas conclusiones al maximizar la utilidad individual sujeta a una restricción presupuestaria. Esto genera curvas de *precios-subasta* (*bid-price*) que muestran cómo los usuarios del suelo mejoran sus apuestas para obtener el espacio y la posición en una ciudad monocéntrica idealizada, a ser derivada. De la Barra generaliza este modelo hacia un sistema de lugares centrales y demuestra la consistencia con las teorías de Christaller y Lösch.

Los modelos de interacción espacial son el próximo 'bloque de construcción'. El autor esboza los desarrollos tempranos de la física social y el desarrollo del modelo gravitacional, delinea la teoría de maximización de la entropía de Wilson (1974), y luego muestra cómo se puede llegar a los diversos miembros de la familia de modelos, de acuerdo a diferentes grados de restricciones que se imponen sobre el sistema de interés. A lo largo de este capítulo, el autor señala cómo este tipo de modelos debe ser informado y hacerse consistentes con teoría microeconómica, si es que pretenden levantarse del tratamiento meramente pragmático de estos temas, con lo cual prepara el terreno para el tercer 'bloque de construcción': la teoría de las decisiones discretas. Primero discute cómo el comportamiento microeconómico, al agregarse en un grupo de individuos, genera un grado de variabilidad que debe ser incorporado de alguna manera en la función de utilidad agregada. Esta función es luego derivada utilizando teoría de probabilidades, que conduce al llamado modelo multinomial logit. Este modelo resulta idéntico al modelo de interacción espacial agregado del capítulo anterior, pero la teoría permite hacer corolarios mucho más sólidos sobre el modelo en términos de la forma en que los costos y beneficios pueden ser representados en la teoría. El autor muestra cómo se puede derivar una medida de costo-beneficio como una utilidad promedio que es equivalente conceptualmente al muy utilizado indicador de excedente al consumidor, un componente importante en la economía del bienestar. Esto lleva muy naturalmente a secuencias de modelos de elección discreta a insertar en forma jerárquica, especificada como cadenas de utilidad compuesta, proveyendo así el mecanismo esencial para la construcción de modelos urbanos integrados.

En este punto de la Barra provee al lector el marco en el cual se pueden insertar estos modelos integrados. Primero hace una revisión de los diversos modelos de contabilidad social utilizados para representar las relaciones funcionales tales como las que se encuentran entre el ingreso, el consumo, la producción, el ahorro y la inversión en los modelos macroeconómicos clásicos. Explora el modelo de base económica y luego introduce el modelo input-output de Leontief. Esto permite una discusión muy útil para describir las fuerzas motrices de la economía urbana. Luego presenta una versión espacial de este modelo, mostrando la

forma en que se pueden combinar las relaciones funcionales basadas en multiplicadores urbanos, con las relaciones espaciales basadas en interacciones. De hecho, los modelos presentados son todos separables con respecto al tratamiento de las interacciones funcionales y espaciales, a pesar de la sugerencia de que ambos conjuntos de interacciones son interdependientes, y por lo tanto requieren una estimación consistente en términos de cadenas de decisiones en estructuras iterativas hasta la convergencia.

En este punto, todos los elementos necesarios para diseñar y aplicar modelos urbanos abarcales y comprensibles han sido ensamblados, y de la Barra muestra cómo se pueden desarrollar modelos que combinan los enfoques de input-output, interacción espacial y teoría de decisiones discretas. También demuestra cómo la demanda por y oferta de suelo pueden ser reconciliadas con relaciones simples entre demanda, precio y oferta, esencialmente construyendo sobre el enfoque pionero de Echenique (1977). El autor introduce modelos para la representación de movimientos migratorios, y demuestra cómo los modelos pueden resolverse a través de las jerarquías espaciales.

En la última parte sustantiva del libro se presentan los modelos de transporte. Un tema de particular importancia es si debemos construir modelos *enlazados* o modelos *integrados*. Los modelos enlazados de usos del suelo y transporte consisten en simplemente ‘pegar’ estos dos modelos otrora desarrollados independientemente y por lo tanto separables, y luego iterar entre ellos (a veces en el tiempo) para asegurar un equilibrio. Por contraste, el enfoque integrado involucra poner en secuencia las cuatro etapas del proceso de modelación de usos del suelo y transporte basado en la escogencia de localización, de viajar, de modo, y de ruta en una cadena de decisiones hacia adelante, y luego recorrer hacia atrás reestimando costos hasta converger en un estado de equilibrio. En este mismo capítulo de la Barra trata el tema del análisis de redes necesario para construir los caminos y resolver el problema de la asignación. De hecho, él se desvía considerablemente para tratar diversos algoritmos de búsqueda de pasos y sugerir sus propias propuestas para la restricción de capacidad, pero finalmente vuelve a recoger y juntar todas las cuerdas al referirlas a las cadenas de decisión apropiadas.

El último capítulo presenta una versión del modelo integrado de usos del suelo y transporte que de la Barra y sus colegas han aplicado para una variedad de casos reales de planificación y definición de políticas. El modelo TRANUS, como se denomina, es una suite de modelos basados en microcomputadores que integran input-output, interacción-localización y transporte operando dinámicamente en el tiempo. Estos modelos han sido utilizados en una variedad de circunstancias para explorar planes de desarrollo urbano (como el caso de la isla de Curaçao), para predecir los impactos de transporte masivo en Caracas, para evaluar futuras líneas de ferrocarril y autopistas en Venezuela, o para analizar configuraciones idealizadas y evaluarlas en términos del uso de la energía. Estas aplicaciones aportan importantes conclusiones. En un apéndice el autor describe brevemente diversos programas de computación que desarrolló para ejemplificar las teorías y modelos descritos a lo largo del texto, programas que pone a disposición de los lectores que los soliciten.

Este es un libro muy oportuno. Es claro y conciso y provee al lector interesado una vista en perspectiva del estado del arte a un nivel de detalle suficiente para informar sobre los detalles operativos de los diversos modelos, pero a un nivel general necesario para tener el pai-

saje completo. De esta manera el mensaje de este libro no se pierde en una maraña de detalles técnicos, ni es tan general como para servir sólo como un libro de conceptos. Personalmente me habría gustado ver más énfasis en la derivación de la idea de las cadenas de decisiones y en la definición del excedente al consumidor, que es tan importante en la temática que relaciona todos estos modelos parciales y los transforma en uno solo. Aunque se presentan todas las ideas clave que han impulsado los modelos durante estos últimos veinte años, también me habría gustado más detalles sobre el enfoque de equilibrio en el modelo integrado de generación, distribución, reparto modal y asignación. También pienso que algo se debió decir acerca del otro gran tema unificador de los modelos integrados de usos del suelo y transporte que involucra la síntesis de utilidad y maximización de la entropía a través de procesos de optimización. Pero el libro es corto y su ventaja es su contundencia y claridad. El libro puede usarse como texto avanzado y como marco que apunta a otros textos como Wilson (1974) sobre interacción espacial, y Ben Akiva y Lerman (1985) sobre decisiones discretas, pero tengo mis dudas si podrá ser utilizado de esta manera a no ser que se produzca a mucho menor costo como edición rústica.

Como está, el libro es una exposición clara del estado del arte, tan útil para profesionales de la modelación como para estudiantes de posgrado e investigadores. A pesar que pienso que hay algunas partes del texto que podrían ser aún más claras, como por ejemplo la solución del modelo de insumo producto al principio de la página 90² que parece ambigua, y el signo más que falta en la ecuación (5-27)³, en general el libro está extraordinariamente bien escrito y se ha beneficiado de la larga y perspicaz experiencia de de la Barra en el tema. Es una importante contribución a una creciente literatura sobre modelación urbana, regional y de transporte, y que demuestra que el campo está cada vez más maduro, y que este tipo de modelos son cada vez más apropiados para situaciones prácticas en la medida que los investigadores entran en sintonía con las circunstancias en que estos modelos pueden brindar los mejores frutos, y las útiles variantes para abordar diferentes situaciones. Exhorto al lector de esta nota, así como a los editores, a hacer lo necesario para que el campo de conocimiento tome consciencia de la importancia de este libro.

M Batty

Referencias

- Batty M, 1976, *Urban Modelling: Algorithms, Calibrations, Predictions* (Cambridge University Press, Cambridge)
- Ben Akiva M, Lerman SR, 1985 *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand* (MIT Press, Cambridge, MA)
- Bertuglia C S, Leonardi G, Wilson A G (eds), 1990, *Urban Dynamics: Designing an Integrated Model* (Routledge, Chapman and Hall, Andover, Hants)
- Boyce D E, 1988, *Renaissance of large-scale models*. Papers of the Regional Science Association, **65**, 1-10

² NdT: Se refiere a la ecuación (5-26).

³ NdT: Esto está corregido en esta traducción.

- Echenique M, 1977, An integrated land use and transport model. *Transactions of the Martin Centre*, **2**, 195-230
- Lowry I S, 1964 *A model of Metropolis*. RM-4035-RC. The Rand Corporation, Santa Monica, CA
- Putman S H, 1983 *Integrated Urban Models* (Pion, London)
- Wilson A G, 1974 *Urban and Regional Models in Geography and Planning* (John Wiley, Chichester, Sussex)

Prefacio de la edición original inglesa

Este libro tiene un doble propósito. Por una parte está estructurado en forma de texto. Los temas están tratados de manera secuencial tal que el lector pueda seguirlos desde los conceptos básicos hasta formulaciones más elaboradas. La mayoría de los elementos para su adecuada comprensión están incluidos para que el texto sea lo más autosuficiente posible, con un mínimo de referencias bibliográficas. Por otra parte este libro es el resultado de una extensa labor de investigación. El lector avanzado encontrará muchas propuestas estimulantes, algunas más novedosas que otras, y algunas más pertinentes que otras.

La modelación integrada de usos del suelo y transporte es un área de investigación que tuvo un pico muy alto en Gran Bretaña en los primeros años de la década de los setenta. Las aplicaciones prácticas en los países industrializados, sin embargo, han estado muy limitadas, principalmente por el crecimiento lento de las ciudades de Europa. En la segunda mitad de los setenta y la primera mitad de los ochenta se dieron avances considerables en la teoría y el desarrollo de modelos operativos en el área de transporte. La mayoría de las ciudades de USA y Europa utilizan a diario modelos sólo-transporte para sus necesidades de planificación, y consideran la localización de actividades y los usos del suelo como un conjunto relativamente estable de información externa a los modelos.

La situación en los países del tercer mundo es muy diferente. Las ciudades crecen tan rápido que la interacción entre la localización de actividades y el sistema de transporte se transforma en un tema dominante. En consecuencia, no debe sorprender que las aplicaciones presentadas en este libro hayan sido realizadas en su mayoría en Venezuela. Es posible que esta área de investigación vea nuevas luces en Europa debido a su potencial para la evaluación del uso de energía en ciudades y regiones.

La idea de escribir este libro se originó en mi tesis de doctorado en la Universidad de Cambridge, UK. El objetivo tanto de la tesis como de este libro es el proponer un marco teórico general y consistente para el análisis de los usos del suelo y el transporte. Hay muchas ventajas en desarrollar y presentar una explicación unificada para la mayor parte de los fenómenos urbanos, y el propósito de este libro es presentar dicha explicación de la manera más clara posible.

Este libro difiere de la tesis doctoral original en varios aspectos. En primer lugar, varios años de investigación y desarrollo en el área de modelación integral de usos del suelo y transporte modificaron de manera sustancial muchas de las proposiciones originales. En segundo lugar, un número considerable de aplicaciones de los métodos *en el mundo real* generaron numerosas mejoras. Finalmente, una década de enseñanza de posgrado en la Universidad Central de Venezuela me permitieron presentar los temas de manera más ordenada y lógica, con lo cual espero que todo resulte más claro y fácil de comprender.

El primer capítulo de este libro está dedicado a la epistemología de las ciencias sociales en general y a los modelos en particular. Aunque no pretende ser un tratado completo exhaustivo, el tema es tratado con relativa extensión, porque considero que frecuentemente se presentan confusiones con respecto al método científico en ciencias sociales. El rol de los modelos, en particular, no ha sido cubierto de manera satisfactoria en la literatura. Esto requiere mucho más investigación, especialmente porque las ciencias sociales están pasan-

do por una vorágine de innovaciones metodológicas, en las cuales el uso de modelos tendrá una posición de creciente importancia.

El segundo capítulo trata de teorías y modelos espaciales basados en teoría microeconómica. No sólo representan el origen histórico de los modelos de usos del suelo y transporte, sino presentan también conceptos básicos que se utilizan en el resto del libro.

El segundo capítulo revisa los modelos de interacción espacial, desde sus orígenes gravitacionales hasta su derivación por maximización de la entropía. Al final de este capítulo se presenta una comparación entre los modelos microeconómicos y el enfoque de interacción espacial, no sólo desde el punto de vista teórico, pero también con respecto a la representación matemática, un asunto de gran importancia.

El Capítulo 4 trata sobre la teoría de utilidad aleatoria, la cual es presentada como un puente entre la perspectiva microeconómica y la interacción espacial, permitiendo la integración entre los principios de la primera y la representación discreta, agregada, de la segunda. Esto representa la espina dorsal para los temas que se tratan en el resto de los capítulos.

Sobre esta base, el Capítulo 5 se dedica a la teoría macroeconómica de la producción, especialmente el modelo de insumo-producto, estableciendo una relación estrecha con la interacción espacial. El amplio marco teórico que provee el modelo de insumo-producto puede ser utilizado para la representación de ciudades y regiones, y si se le incorporan precios y elasticidades junto a los principios de utilidad aleatoria, es posible lograr una completa interpretación de los mercados espaciales. El Capítulo 6 elabora estos principios, presentando una serie de temas relacionados con los usos del suelo, la localización de actividades en el espacio, demanda y oferta de espacio construido y la formación de mercados inmobiliarios.

El Capítulo 7 cubre el sistema de transporte, su relación con los usos del suelo y las relaciones entre oferta y demanda que prevalecen. Por brevedad, sólo se tratan los aspectos de la oferta que afectan a la demanda.

Finalmente el Capítulo 8 hace de especie de apéndice a los capítulos teóricos que lo preceden, al presentar un modelo operativo de usos del suelo y transporte desarrollado por este autor y Beatriz Pérez en Venezuela. La idea de presentar este modelo, denominado TRANUS, es el ilustrar las implicaciones prácticas de la teoría desarrollada. Primero se describe brevemente el modelo y luego se presentan varias aplicaciones a casos reales para demostrar su utilidad.

Agradecimientos

El número de personas a quienes quiero agradecer va más allá de las limitaciones de un libro como éste. Sin embargo una lista mínima debe comenzar por mi supervisor del doctorado en la Universidad de Cambridge Marcial Echenique. Lionel March sugirió la idea de producir este libro y me alentó para que lo hiciera. Muchos amigos también me ayudaron con sus sugerencias y críticas, especialmente Ian Williams, Tony Flowerdew, Alex Catalano, Marta Valmitjana, Peter Rickaby y Luis Carlos Palacios. Luego están mis alumnos de la Universidad Central de Venezuela con sus preguntas inteligentes y a veces perturbadoras.

Es común que este tipo de libros agradezca también a la paciencia y resistencia de la esposa del autor. En mi caso, Beatriz Pérez aportó una crítica amorosa, y como ella participó por muchos años en el esfuerzo de investigación y desarrollo, para mí resulta difícil trazar una línea divisoria entre mi trabajo y el de ella.

También es común que el autor agradezca a la persona que ayudó a producir el manuscrito tipografiado. Hoy en día, con los potentes computadores que tenemos y sus procesadores de texto, la distancia entre el sucio manuscrito del autor y el hermoso producto final ha desaparecido. En consecuencia debo agradecer a mi computador por reproducir en pantalla y sin quejarse, el proceso en que las ideas borrosas se transforman y crecen en claridad.

Finalmente debo agradecer al editor de Cambridge University Press por ser cooperativo y comprensivo por un período de tiempo tan largo.

1 Ciencias sociales y planificación

Es muy común el punto de vista que señala que las ciencias sociales son muy diferentes a otras formas de ciencias, de allí la necesidad de desarrollar sus propios métodos. En la primera sección de este capítulo se argumenta que, aunque hay diferencias importantes, los modernos desarrollos tanto en las ciencias sociales como en las que aquí llamaremos ciencias naturales, tienden a reducirlas, apuntando hacia un marco metodológico común. Esta idea sirve de introducción a las secciones siguientes donde se propone un método científico para las ciencias sociales, y el rol que los modelos pueden jugar en ello.

1.1 Ciencias naturales y ciencias sociales: la hipótesis de la convergencia

Tradicionalmente se considera que las *ciencias sociales* son una forma de ciencia muy especial, diferente a la biología, la física, o en general, las *ciencias naturales*. Se proponen muchos argumentos en favor de esta distinción. En primer lugar, se dice que los fenómenos naturales son *permanentes*, esto es, no cambian en el tiempo. Por ejemplo, el agua hierve a 100° a nivel del mar y lo seguirá haciendo en el futuro de manera indefinida. Por contraste, los fenómenos sociales son permanentemente cambiantes. Como consecuencia, las teorías que explican los fenómenos naturales son verdades permanentes o *leyes de la naturaleza*. Es posible que en ciencias naturales las teorías mismas cambien, y las viejas sean reemplazadas por nuevas, pero una vez adoptada una teoría, se le considera permanente en el tiempo. Si el fenómeno social cambia continuamente, las teorías sociales sólo serán válidas por un período de tiempo relativamente corto. En otras palabras, tienen una referencia histórica específica.

Dado que se asume que el fenómeno natural es permanente, las teorías que explican exitosamente su comportamiento en el pasado tienen una fuerte capacidad predictiva. En ciencias sociales, aún si una teoría explica acertadamente un fenómeno que ocurrió en el pasado, sólo puede proveer predicciones en la medida que prevalezcan las condiciones históricas.

Otra diferencia que se señala frecuentemente es que el fenómeno natural puede ser reproducido en las condiciones controladas de un laboratorio, aislándolas de cualquier efecto externo indeseado. En las ciencias sociales es imposible experimentar de esta manera, porque sería muy costoso e injusto con las personas involucradas, y porque el sólo hecho que las personas estén en un experimento, hace que cambien de comportamiento y se distorsionen los resultados. Las ciencias sociales estarían limitadas en términos de evidencias empíricas, tal que las teorías sólo pueden inferirse de datos que describen su comportamiento en el pasado, y nunca pueden ser aisladas de su entorno complejo.

Otro argumento muy popular para explicar las diferencias entre ciencias naturales y sociales es que, dado que el científico social es él mismo parte de un determinado

entorno social, sus proposiciones están influenciadas por su ideología y por su relación personal con el fenómeno que se está investigando. Por el contrario, se dice que el científico natural es neutral, y que sus puntos de vista políticos no tienen influencia alguna sobre su investigación.

A pesar de la fuerza de estos argumentos que apuntan a una clara diferenciación entre ciencias naturales y sociales, los científicos de ambos campos comienzan a reconocer que estas diferencias tienden a desvanecerse, haciendo que sea cada día más difícil establecer una línea clara de demarcación. Hay muchos fenómenos que han promovido este proceso. En las últimas décadas, las ciencias naturales han sido sacudidas por la introducción de nuevas teorías que han cambiado completamente, sino contradicho, viejos bastiones teóricos. Frecuentemente se pone como ejemplo la teoría de la relatividad como un cambio fundamental en el pensamiento científico en física. La teoría de la gravedad de Newton era concebida como una verdad permanente, verificada en innumerables experimentos y capaz de producir predicciones útiles y siempre exitosas. Sin embargo la teoría de la relatividad emerge como una nueva teoría, y para hacer peor las cosas, basada en muy poca evidencia empírica.

Esto representó un desafío directo a la *inducción* como método para crear conocimiento. La inducción establece que las teorías científicas deben ser inferidas de observaciones directas de la realidad. Esto, en el caso de la teoría de la relatividad, ciertamente no fue así. Más aún, llevó mucho tiempo para que se pudieran reproducir algunos aspectos de la teoría en condiciones de laboratorio. Con esto, comenzó a surgir gradualmente la evidencia que las leyes de la naturaleza deben ser entendidas como meras construcciones intelectuales, en lugar de entidades reales sustantivas. Los científicos empezaron a ser escépticos acerca de verdades permanentes.

Hoy en día las teorías en ciencias naturales son simplemente consideradas como un conjunto de proposiciones que intentan una explicación del fenómeno real. Puede haber un gran número de teorías que explican un fenómeno en particular, de tal manera que el científico debe escoger entre teorías competitivas la que le parece que provee una mejor explicación. En consecuencia, las teorías nunca son verdades absolutas: son opciones preferidas, a reemplazar si dejan de ser útiles.

Kuhn (1962) argumenta que los científicos trabajan sobre la base de un conjunto de teorías aceptadas o *paradigmas*. Esto se define como ciencia *normal*. Sin embargo puede surgir un descubrimiento que de manera importante modifique o contradiga el paradigma existente. Viene, entonces, un período *revolucionario*, en el cual el viejo paradigma es reemplazado, y comienza un nuevo período normal. Lo que ha estado ocurriendo en este último siglo es que la velocidad en que ocurre este proceso se ha incrementado, al punto de hacer difícil la distinción entre períodos normales y revolucionarios.

También ha habido un cambio en la manera en que los científicos están construyendo teorías sobre fenómenos naturales que los acerca a los métodos en ciencias sociales. Causa y efecto eran considerados como un principio estricto respetado por todos. Entre la causa 100° y el efecto agua hirviendo no puede haber tolerancia alguna, y para que la teoría fuera respetada y aceptada debería corresponder a todos los casos de manera exacta. Sin embargo, en las últimas décadas este principio ha sido relaja-

do. Enfrentados a la tarea de explicar un gran número de eventos simultáneos los científicos han estado desarrollando teorías en que una causa produce un efecto con cierto grado de probabilidad. Ejemplos clásicos son termodinámica, mecánica estadística, fractales y otros. Estos son desarrollos relativamente recientes, y no olvidemos que incluso Einstein aborrecía la idea que en la naturaleza algo pudiera ocurrir por casualidad, aleatoriamente. Hoy en día muchos sistemas naturales en física y biología son concebidos como eventos que cambian permanentemente, y los representan con conceptos tales como probabilidades, verosimilitud, márgenes de error, catástrofes y sorpresas, y se habla de márgenes de error. Esto significa que tanto las ciencias naturales como sociales cada vez más utilizan métodos similares. La Estadística se ha transformado, quizás, en el principal terreno común, y es una excepción en el sentido de que es una de las pocas ramas de las matemáticas que fueron desarrolladas específicamente para las ciencias sociales y luego fueron adoptadas por la física y la biología.

Las ciencias sociales reconocieron tempranamente el carácter cambiante de los fenómenos reales. Marx (1847) criticó la formulación de leyes permanentes sobre fenómenos sociales que los economistas de su época habían adoptado con entusiasmo. Tales leyes, afirmaba Marx, deben ser entendidas como meras construcciones humanas, y por lo tanto deben ser adoptadas sólo en la medida en que sean útiles. *‘Las mismas personas que establecen relaciones sociales ... también producen principios, leyes y categorías en conformidad con sus relaciones sociales. En consecuencia estas categorías no son más eternas que las relaciones sociales que ellas expresan. Son productos históricos y transitorios.’*

En el caso de la planificación, el tema principal de este libro, el proceso de convergencia se ha acelerado por el hecho de que muchas disciplinas que se originaron en la tradición de las ciencias naturales se han movido a áreas tales como economía, urbanismo y arquitectura. Ingenieros de transporte han expandido su área de interés desde el tráfico a las causas que generan el tráfico, como la localización de actividades y las características socioeconómicas de los conductores. Los ingenieros industriales se han movido desde los aspectos estrictamente técnicos de los procesos productivos a una visión mucho más amplia del entorno social y económico que rodea la producción. Su contribución a las ciencias sociales ha sido significativa, siendo las áreas más conocidas la programación lineal, análisis de sistemas y cibernética. La Geografía también ha contribuido al proceso de convergencia al incorporar firmemente al análisis urbano y regional entre sus especialidades e introduciendo métodos y teorías antes aplicadas a la Geografía Física.

Muchos autores describen este proceso como la *revolución cuantitativa* (Batty 1976), porque representa un importante cambio en la manera de pensar. Un siglo atrás las ciencias sociales eran consideradas como un área de investigación ‘blanda’ interesada en fenómenos que nadie podría describir seriamente como problemas científicos. En la batalla por el reconocimiento, los científicos sociales reaccionaron con una muralla defensiva, insistiendo que se requerían métodos y términos propios. Se exigía de los iniciados que adoptaran estas peculiaridades de todo corazón, y cualquier intento por adoptar métodos o analogías a las ciencias naturales eran denunciados como anate-

ma. Hoy en día, en la medida que las ciencias sociales han adquirido una sólida reputación, esta tendencia de ruptura y aislamiento ha perdido fuerza, tal que la fertilización cruzada con otras disciplinas ya no es considerada negativamente.

En este proceso de convergencia, la invención y creciente disponibilidad de computadores se ha transformado en un importante elemento en común para todas las ciencias. Los eventos sociales se describen en grandes bases de datos manipuladas por computadoras. Una vez la data está almacenada de manera conveniente, muchos procedimientos de análisis numérico se hacen posibles, desde estadísticas simples hasta análisis numéricos complejos y econométricos. En el caso de los estudios urbanos y regionales, la posibilidad de construir grandes bancos de datos con referencias geográficas permite un tipo de análisis que sería imposible sin computadores.

La gran contribución de la computación digital es, sin embargo, la posibilidad de simular, permitiendo al científico social la posibilidad de realizar experimentos. Esto, como se mencionó, es algo que los científicos sociales no podían hacer en el pasado. Dado que es imposible crear las condiciones ideales de un laboratorio, la simulación se ha transformado en un sustituto viable: en lugar de hacer experimentos en ambientes reales, el analista recrea una versión simplificada de la realidad en un modelo computarizado. Una vez satisfecho que el modelo reproduce la realidad a un nivel de precisión aceptable, el analista realiza los experimentos en el ambiente artificial o virtual. La importancia de estos experimentos contribuye no sólo a la toma de decisiones en planificación, sino también a la creación de conocimiento en la investigación científica.

1.2 El método científico

En esta sección se presenta el proceso de creación del conocimiento científico, basado principalmente en la explicación de Popper (1963, 1972). En una sección siguiente estas ideas son adaptadas para explicar la forma en que la gente construye conocimiento social, el proceso de creación de conocimiento en ciencias sociales y en el proceso de planificación. Esto conduce a la introducción de dos casos particulares: el científico y el planificador.

Por mucho tiempo se pensó que el elemento que distingue al científico de otros intelectuales es que utiliza hechos para dar soporte a sus enunciados sobre el mundo real. Este proceso de construir hipótesis sobre la base de observaciones acumuladas se conoce como *inducción*, y fue formulado originalmente por Bacon. Según este método, el científico identifica un fenómeno localizado en algún punto en la frontera entre lo que se conoce y lo que se ignora. Los científicos recolectan información sobre el fenómeno hasta que puedan formular diversas hipótesis para explicarlo. Esto conduce a un proceso de discusión, y la hipótesis que acumule un mayor número de evidencias corroborativas se transforma en una verdad aceptada. Con esto la frontera entre el conocimiento y la ignorancia se desplaza, y se abre un área de investigación completamente nueva.

La inducción se basa en el principio que la prueba que requiere una hipótesis para ser aceptada es un conjunto de evidencias confirmativas, lo cual es la base para la crea-

ción del conocimiento científico. Sin embargo, resulta claro que si bien un abrumador número de evidencias confirmativas nos llevan a pensar que una determinada hipótesis es correcta, no necesariamente lo demuestra. Para explicar esto, Popper (1963) utiliza el clásico enunciado '*todos los cisnes son blancos*'. Un científico puede utilizar una cantidad considerable de energía buscando cisnes blancos, encontrando miles de evidencias que confirman esta hipótesis. La magnitud de la evidencia confirmativa puede ser tal que podemos inducirnos psicológicamente a creer que hemos llegado a una verdad permanente y absoluta. Los zoólogos pueden trabajar alegre y creativamente sobre esta base por muchos años – hasta que alguien descubre un único caso de un cisne negro. La conclusión es, entonces, que la evidencia confirmativa no prueba nada, y sin embargo es la base para el conocimiento científico. Este perturbador argumento fue presentado por Hume y se conoce como el *dilema de Hume*.

Para resolverlo, Popper propuso el concepto de la *asimetría lógica* entre verificación y falsificación, que simplemente dice que si bien ninguna cantidad de evidencias confirmativas puede demostrar la veracidad de un enunciado, una sola pieza de evidencia refutable demuestra su falsedad. Esto, sin embargo, no debe considerarse como algo desafortunado, ya que es precisamente la evidencia refutable la que permite al científico mejorar su enunciado original. En el ejemplo anterior el enunciado puede ser ahora '*no todos los cisnes son blancos*', o mejor aún, el científico puede definir los cisnes en términos diferentes a color, tal como su estructura genética o cualquier otro término, que además de ser más general contiene más información.

En consecuencia, para crear conocimiento, los científicos deben buscar siempre evidencias que refuten más que las que confirmen. Según Popper, el hecho que un enunciado en particular sea potencialmente refutable, establece el criterio de demarcación entre ciencia y no-ciencia. Por ejemplo, el enunciado '*el sol saldrá mañana entre las 6 y las 9 am*' es un enunciado científico, porque aún si tiene un alto grado de probabilidad en determinadas latitudes, siempre existirá la posibilidad de que en algún momento sea falso. El enunciado correrá mucho más riesgo de ser falso si decimos que '*el sol saldrá entre las 7:30 y las 7:32 am*', pero será mucho más útil. Para este tipo de enunciados siempre será posible inventar un experimento que lo ponga en riesgo. Por contraste un enunciado tal como '*Buda es eterno*' puede inspirar y ser considerado como una idea útil por millones de personas, pero como es imposible de refutar, no puede ser considerado como un enunciado científico.

Popper también describe la construcción de conocimiento como un proceso social, en el cual es posible distinguir tres mundos: el mundo 1, el mundo de las cosas materiales existentes, el mundo 2, el mundo de las mentes individuales donde tiene lugar el proceso de construcción de conocimientos, y el mundo 3, el mundo de la cultura, los libros, las obras de arte, escuelas, instituciones, tradiciones y otros similares, donde se acumula el conocimiento. El mundo 3 existe independientemente de los individuos, y por lo tanto puede ser concebido como *conocimiento objetivo*.

El proceso científico es así:

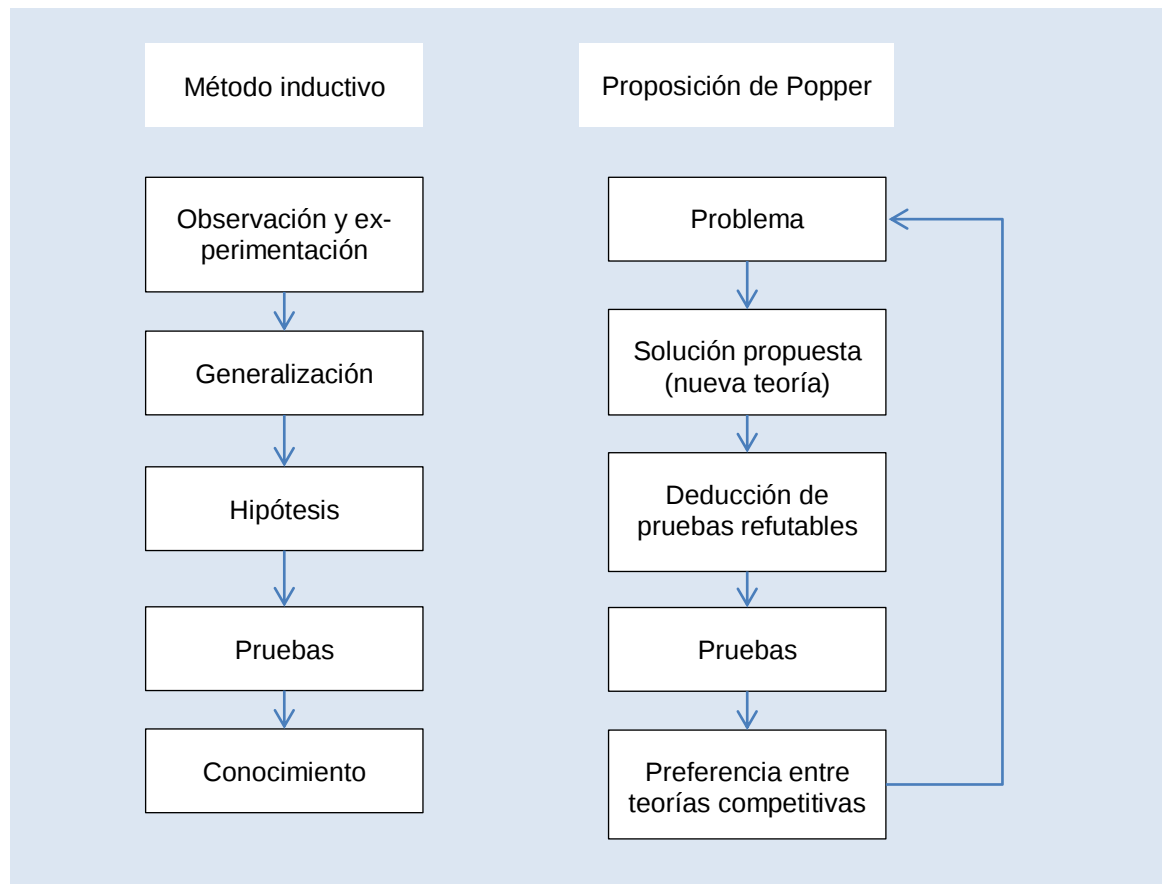
- el fenómeno objeto de investigación existe en el mundo 1

- las teorías son concebidas en el mundo 2 en la forma de enunciados refutables, que luego son contrastados con eventos del mundo 1
- las teorías preferidas son sumadas al conocimiento previo, transformándose en conocimiento objetivo en el mundo 3

El conocimiento objetivo acumulado previamente afecta la manera en que los individuos perciben el mundo real, y provee el trasfondo cultural en el proceso de poner a prueba y seleccionar una teoría preferencial.

Independientemente del hecho que las soluciones sean aceptadas o no, forman parte del conocimiento objetivo. Aquí es donde se almacenan los productos intelectuales, tal que puedan ser utilizados por otros en próximos ciclos de la investigación científica. Una teoría rechazada puede ser tan valiosa como una aceptada, porque eventualmente puede pasar a ser aceptada, o porque partes de ella pueden ser utilizadas para ensamblar una teoría mejorada, o simplemente porque falló en las pruebas, ya que estas fallas pueden sugerir problemas que de otra manera podrían haber pasado desapercibidas.

La forma en que se estructura el método científico también es importante. El método inductivo tradicional es un proceso lineal cuya etapa inicial es la *observación*. La etapa siguiente en el proceso es la *generalización* de la cual se puede inducir una teoría que luego es puesta a prueba en la experimentación. Si estas pruebas aportan suficientes evidencias confirmativas, el enunciado exitoso se transforma en conocimiento. Popper argumenta que la observación de la realidad no puede ser el punto de inicio del proceso de investigación. Lo que determina qué es lo que vamos a observar está determinado por la necesidad de resolver algún problema. La identificación de problemas reemplaza a la observación como elemento impulsor del método científico, después del cual una solución propuesta (nueva teoría) conduce a la deducción de enunciados posibles de poner a prueba. Después de las pruebas (intentos de refutación) debe establecerse una preferencia entre las teorías competitivas. Una vez aceptada, surgen nuevos problemas, reiniciándose así el proceso una y otra vez. El proceso científico se torna cíclico o iterativo, en vez de lineal. El método inductivo y la propuesta de Popper se resumen en la Figura 1-1.

Figura 1-1: El método científico inductivo y la proposición de Popper

1.3 Fenómenos sociales y el conocimiento social objetivo

El enfoque presentado arriba es particularmente relevante para los fenómenos sociales, y en esta sección se propone una adaptación particular del método científico de Popper. Para comenzar, la idea de los tres mundos puede ser muy útil para explicar los eventos sociales en general. Todos los individuos, organizaciones sociales y sus relaciones con el medio ambiente constituyen el mundo 1. Cada miembro individual de la sociedad es el mundo 2, y como tal, identifica una serie de problemas, condicionado por su trasfondo cultural, ideológico y político. Este entorno, el almacén donde se acumulan las experiencias de la sociedad, constituye el mundo 3, el *conocimiento social objetivo*. Dentro del mundo 2 los individuos conciben soluciones alternativas a los problemas que han identificado en la forma de posibles cursos de acción, en lugar de teorías científicas.

Si seguimos estrictamente la descripción del método científico de Popper, la siguiente etapa debería ser la deducción de enunciados que pueden ser sometidos a prueba, es decir, experimentos para intentar refutar las soluciones alternativas. En el caso de eventos sociales, sin embargo, los individuos no pueden realizar experimentos en el mundo 1. Pueden recurrir, en cambio, a la evidencia histórica, suponiendo que si una determinada acción funcionó o no en el pasado, algo similar ocurrirá en el futuro cercano.

Cada individuo decidirá entre los cursos alternativos de acción a su disposición de acuerdo al nivel de beneficios que espera de cada uno. En otras palabras, los individuos estimarán los que les producirá cada curso de acción alternativo si es que lo adoptan, y optarán por aquel que les recompensará con los mayores beneficios. Esto es aproximadamente lo que se entiende como maximización de la utilidad en economía. Pero ¿cómo estiman los beneficios esperados? Para esto el individuo decisor debe tener una idea de la forma como está estructurada la sociedad, de la forma en que, como individuo, se relaciona con el resto de la sociedad, y de la forma como piensa que reaccionarán los demás miembros de la sociedad ante cada una de las posibles acciones. Cada individuo entenderá su entorno social de manera particular, y concebirá la sociedad como un conjunto de elementos (el Estado, instituciones, grupos sociales, etc.) y un conjunto de relaciones entre ellos. En otras palabras cada individuo tendrá, consciente o inconscientemente, un modelo de su propio entorno social. Los individuos utilizarán este modelo mental para poner a prueba los distintos cursos de acción de manera imaginaria y anticipada. De estas pruebas simuladas, una solución preferida surgirá y conducirá a una acción determinada, modificando el mundo 1. La acción tomada puede o no tener el efecto anticipado. La similitud con los efectos anticipados dependerá de la precisión del modelo mental, de las acciones tomadas por otros, y otros posibles efectos no previstos.

Todos los cursos de acción formarán parte del mundo 3, el conocimiento objetivo de la sociedad. Surgirán nuevos problemas, ya sea porque el entorno social cambia, porque es necesario realizar correcciones y ajustes a las acciones tomadas, o por consecuencia directa de ellos. La principal característica de este proceso, en el cual un gran número de individuos están simultáneamente definiendo problemas, probando cursos alternativos de acción con numerosos modelos, y finalmente actuando simultáneamente sobre el entorno social común, puede definirse como la *multiplicidad del conocimiento objetivo social*.

No reconocer esta multiplicidad puede llevar a concepciones erradas. El mismo Popper (1966) hace una traducción directa de su propia descripción del proceso en el que los científicos crean conocimiento, a la forma en que la sociedad construye conocimiento social objetivo. Para incentivar este proceso, Popper (1966) propone una *sociedad abierta*, en la cual la crítica, la discusión y el principio de la refutación son los medios para crear conocimiento social. Campbell (1959) utiliza una idea similar para definir una sociedad experimental, en la cual se realizan regularmente experimentos en el mundo real para incrementar el conocimiento social. Batty (1975) describe esto como un proceso de aprendizaje social, pero reconoce la existencia de conflictos. Diversos grupos sociales pueden tener objetivos conflictivos, y pueden concebir una

posible solución a un problema común como contrario a sus propios intereses. El rol del planificador, de acuerdo a esta concepción, consiste en identificar estos conflictos y proveer canales de comunicación para poder llegar a soluciones de compromiso, a medio camino entre dos intereses en conflicto.

Desde un punto de vista marxista, la posibilidad de alcanzar consensos e incluso simples compromisos, está limitada en una sociedad estructurada sobre la base de clases sociales, porque conflictos básicos como la explotación de los trabajadores por los dueños del capital, no tiene solución. La única solución posible es alcanzar una sociedad sin clases, esto es, sólo si abolimos la propiedad privada de los medios de producción será posible resolver los conflictos (que seguirían existiendo).

Puede concluirse, entonces, que los procesos sociales son mucho más complejos que los científicos debido a los dos factores descritos: multiplicidad y conflictividad. Todos los miembros de una sociedad están trabajando activamente en numerosos mundos 2, de tal manera que la solución preferida se transforma en la adopción de numerosos cursos de acción, frecuentemente conflictivos. Una nueva situación social emerge como resultado de estas numerosas acciones, forzando su camino a través de una red de relaciones sociales. El grado de éxito de cada individuo dependerá de su cuota de poder dentro de la estructura social, así como lo acertado de sus acciones. Para aumentar su influencia, los individuos tenderán a agruparse con otros cuyo modelo social es similar, y con quienes los compromisos están dentro de un rango aceptable. Esto lleva a la formación de partidos políticos, gremios, grupos de acción y diversas organizaciones. Cada grupo crea su propio conocimiento social objetivo.

1.4 Científicos sociales y planificadores

El proceso descrito anteriormente aplica para todos los miembros de una sociedad en particular, pero hay dos casos especiales que ameritan más discusión: el científico social y el planificador.

1.4.1 El científico social

El objetivo del científico social es incrementar el conocimiento acerca de los fenómenos sociales. Para lograr esto, seguirá más o menos el mismo proceso que se describió para todos los investigadores científicos. La primera pregunta que surge es ¿en qué medida el científico social está sesgado en su investigación por el hecho que él mismo es un miembro activo de la sociedad que constituye su objeto de estudio? La respuesta es que, desde la etapa de identificación de problemas hasta la creación final de conocimiento, el científico social está condicionado por su posición en la sociedad, su trasfondo cultural y sus ideas políticas. Pero esto mismo se puede decir de cualquier científico. Cuando un físico o un biólogo escogen su objeto de interés, también está condicionado por su ambiente social. Lo que es claro es que la subjetividad de la ciencia en general no puede ser considerada como una deficiencia. El hecho que un científico pertenece a una sociedad no lo hace ciego, simplemente le provee una perspectiva, y visión y perspectiva van juntas. Por otra parte, los problemas, ya sean naturales

o sociales, son problemas porque afectan a la gente, sino no valdría la pena investigarlos. La única fuente de información que ayuda a un científico a determinar cuáles son los problemas más relevantes a resolver, proviene de su particular posición en la sociedad.

El científico social entonces, puede ser visto como un miembro activo de una sociedad investigando su propio ambiente, de la misma forma en que otros científicos procederán con respecto a cualquier objeto de investigación. El hecho que pertenece a la sociedad es precisamente lo que le permite identificar los problemas, en este caso un fenómeno social particular de relevancia. Formulará una o varias teorías para explicar el problema, y de allí derivará las proposiciones susceptibles a poner a prueba. Se mencionó que en el caso de las ciencias sociales, experimentos de laboratorio no pueden ser realizados, de tal manera que el científico social debe recurrir a modelos. Los modelos son, entonces, *proposiciones verificables que se derivan de las teorías*.

Un ejemplo puede ser útil para ilustrar este punto. Un científico identifica la educación como un problema en una ciudad en particular, porque se da cuenta que estudiantes con IQ similares obtienen resultados diferentes. Elabora una teoría que dice que esto se debe a dos factores: aulas atestadas y el nivel educativo de los padres. Esta teoría, como tal, no puede ser sometida a prueba en la forma tradicional, ya que el investigador no puede cambiar la tasa profesor/alumnos o cambiar el nivel de educación de los padres nada más que para hacer el experimento. Pero puede construir un modelo en que el desempeño de los alumnos, medido en términos de grado de éxito en los exámenes, es una función lineal de la relación profesor/alumnos y de un indicador del nivel educativo de los padres. El investigador procede luego a reunir información relevante para probar el modelo.

De este ejemplo se derivan varias conclusiones. Primero, un modelo es una reinterpretación de una teoría en forma comprobable. Luego debe notarse que de una misma teoría se pueden derivar varios modelos comprobables. Por ejemplo, se podría utilizar una función exponencial en vez de una lineal, o las variables podrían medirse de otra manera. También puede ser que un mismo modelo sirva para poner a prueba varias teorías, por ejemplo, que el nivel educativo de los padres sólo desempeña un papel menor. Los resultados de las pruebas ayudan al científico a establecer una preferencia entre teorías competitivas. También se puede concluir que si las pruebas se realizan en referencia a un caso particular, por ejemplo las escuelas secundarias de Bombay, la teoría puede establecerse a ese nivel, pero si se busca una teoría más general, las pruebas deben realizarse en un conjunto de casos mucho más grande. En consecuencia, algunas teorías se pueden considerar válidas sólo en realidades específicas. De igual manera, y debido al carácter cambiante de la sociedad, la teoría puede considerarse válida para un período histórico específico, pero no para otros, con lo cual las teorías deben ser actualizadas periódicamente.

1.4.2 El planificador

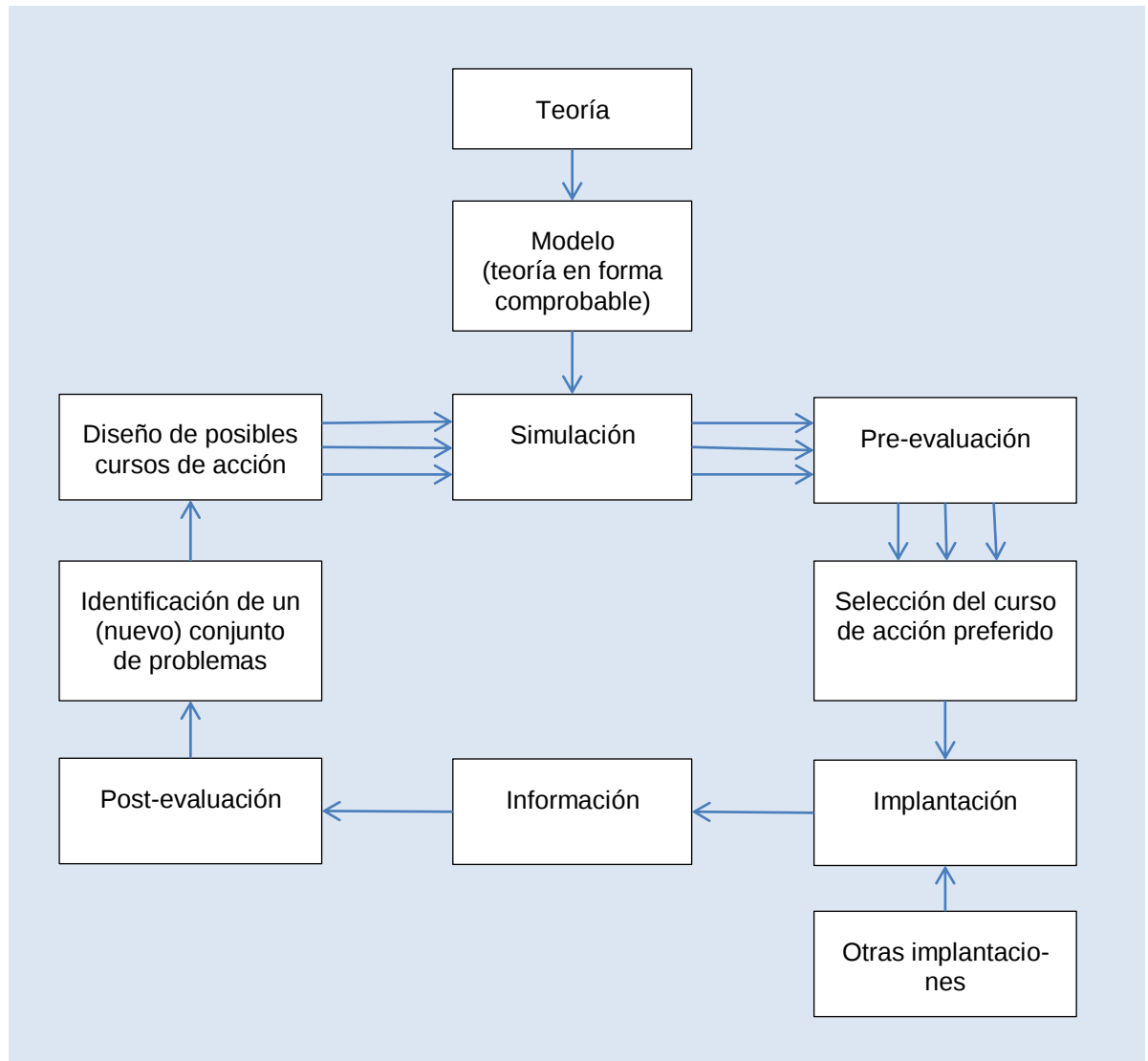
El planificador está involucrado de manera más directa, porque participa en el proceso de toma de decisiones de la sociedad. Los problemas que identifica pueden ser los

mismos que los que identifica el científico social, pero las soluciones que busca son cursos de acción, más que explicaciones o teorías mejoradas.

El proceso de planificación puede concebirse de manera cíclica, como se muestra en la Figura 1-2. La primera etapa es la identificación del problema. El planificador formula una serie de cursos alternativos de acción para poder resolver el problema. El planificador tendrá también una teoría acerca de la forma en que la realidad está estructurada, y acerca de cómo reaccionará a los cambios que se están considerando. El planificador luego someterá a prueba las soluciones propuestas, y para ello utilizará un modelo derivado de la teoría. El modelo puede estar expresado en una variedad de formas, como verbal, físico (icónico) o matemático. El modelo dará como resultado los efectos probables de cada curso alternativo de acción.

Los resultados de las simulaciones son pre-evaluados para estimar los efectos positivos o negativos que cada curso de acción puede producir en los diversos grupos sociales y en el entorno físico. Se llama a esto pre-evaluación porque se realiza antes que se lleven a cabo las acciones. Una vez las alternativas han sido comparadas, se establece una preferencia entre ellas.

Luego de esto el curso de acción propuesto es implantado, es decir, llevado a la práctica. Una vez se ha modificado la realidad por efecto de las acciones, debe recolectarse información para verificar la forma en que se han realizado los cambios. Esto conduce a un proceso de post-evaluación. La información puede indicar que los eventos fueron diferentes a lo que esperaba el planificador, ya sea porque el modelo y/o la teoría no eran correctos, porque ocurrieron eventos externos no previstos, o porque otros individuos o instituciones implantaron sus propios planes. La información también mostrará si los problemas identificados han sido resueltos, y de no ser así, indicará si hay problemas que aún persisten o si debe agregarse nuevos. Si hubo una discrepancia entre las predicciones y los eventos reales, la post-evaluación deberá determinar qué fue lo que los causó: fue debido a la acción distorsionadora de otros actores, el modelo fue inefectivo o la teoría estaba equivocada. Generalmente estos últimos dos aspectos son tratados por los científicos sociales. La post-evaluación puede llevar a la identificación de un nuevo conjunto de problemas o a mejoras en el modelo y/o la teoría, iniciando así un proceso cíclico.

Figura 1-2: El sistema de planificación

1.5 Algunos conceptos básicos sobre modelos

Se argumentó arriba que los modelos son parte del proceso de planificación. Los individuos usan modelos en sus decisiones cotidianas, y así lo hacen también grupos e instituciones. Puede verse a los planificadores profesionales como individuos cuyo papel es ayudar a los grupos o instituciones a llevar a cabo los procesos de toma de decisiones. Se les llama para hacer esto porque se supone que tienen mejores teorías sobre el entorno social, y modelos que son mejores para someter a prueba los cursos de acción posibles.

Por lo tanto la discusión no es sobre si debe utilizarse modelos o no, sino más bien qué tipos de modelos son los más adecuados en cada caso. Aquí comenzamos por

definir y discutir algunos conceptos básicos relacionados con modelos, en particular los más relevantes para la planificación urbana y regional. No hay aquí intención alguna de hacer una clasificación exhaustiva de los modelos, ya que esto ha sido hecho en otros documentos, siendo particularmente útiles los de Echenique (1968), Bunge (1973) y Batty (1976).

Por necesidad, todos los modelos son simplificaciones de la realidad. Esto es así porque sería imposible representar la realidad en todo el detalle: es también intencional. El modelador debe ignorar deliberadamente todos los aspectos que piensa son no esenciales para el problema que se está analizando. La intención es que el modelo represente a su referente real sólo en sus aspectos más significativos. En este sentido un modelo es más una idealización de la realidad que una simplificación. Como lo expresa Bunge, *'hay tantas idealizaciones como idealizadores, data y objetivos. Incluso si dos modeladores tienen acceso a la misma información empírica, pueden construir modelos enteramente diferentes, porque la construcción de modelos es una actividad creativa que involucra el ambiente de fondo, habilidades y hasta los gustos del que los construye.'*

Aquí hemos definido que un modelo es una teoría en forma comprobable. También hemos dicho que un modelo es una representación idealizada de la realidad. Los modelos son, entonces, una especie de intermediario entre la teoría y la realidad. Dado que son de alto nivel de abstracción, las teorías generales, poco interesadas en las particularidades, son difíciles de poner a prueba. Debemos construir modelos que combinen los aspectos teóricos con los reales.

Si llamamos T a una teoría, M a un modelo y R a la realidad, entonces podemos establecer la relación $T \rightarrow M \rightarrow R$. Comencemos por discutir la relación $M \rightarrow R$. En general es mejor mientras más se acerque el modelo a la realidad, pero esto dependerá del propósito con que fue construido el modelo. Si la intención del modelador es hacer una representación lo más precisa posible de la realidad, entonces la bondad del ajuste resultará esencial. El modelador no podrá resistir la tentación de incluir tantos elementos como pueda, así como complejas relaciones funcionales para representar la realidad en toda su riqueza. Sin embargo, si la intención es hacer predicciones a largo plazo acerca del comportamiento futuro del sistema, entonces será más ventajoso incluir sólo aquellos elementos que se piensa son relevantes en el comportamiento a largo plazo, dejando fuera las peculiaridades del corto plazo.

El mismo principio aplica si la intención del modelador es probar la validez de una teoría específica. Si se supone que la teoría sólo aplica a casos específicos, entonces el modelo deberá poder representar esta realidad en todo su detalle, resultando en una relación $M \rightarrow R$ estrecha. Sin embargo si la teoría es general y pretende explicar una gran variedad de situaciones reales, entonces la relación $M \rightarrow R$ no puede ser tan cercana. En este caso la fortaleza de la teoría puede ser medida en términos del número de R 's para las cuales la relación $M \rightarrow R$ aplica.

Desde el punto de vista de la relación $T \rightarrow M$, se puede decir que los modelos varían de acuerdo al grado de contenido teórico. Si pensamos en una teoría como un conjunto de enunciados o hipótesis que explican cómo ciertos aspectos de la realidad pueden ser divididos en sus componentes y cómo estos componentes se relacionan

entre sí, el contenido teórico de un modelo derivado de esta teoría puede medirse en términos del número de hipótesis que están representadas. Por ejemplo, si una teoría $T(H)$ contiene hipótesis $H_1, \dots, H_4$ es posible construir un modelo $M(S)$, $S_1 \dots S_4$ donde cada S denota representaciones específicas de la correspondiente hipótesis H , entonces ese modelo tendrá un máximo grado de contenido teórico. Un modelo $M(S_1, S_3)$, por ejemplo, tendría un contenido teórico menor.

Así como ocurre en la relación $M \rightarrow R$, la simplicidad también puede favorecer la relación $T \rightarrow M$. Podría esperarse que un modelo excesivamente simplificado falle, o dé sólo resultados aproximados, pero de hecho puede decirnos más acerca de los pro y los contra de una teoría y su referente real que un modelo altamente sofisticado. En este último caso puede resultar difícil tener una percepción aguda del problema por la dificultad de desenredar el gran número de relaciones causa-efecto. Como lo expresa Bunge (1973) '*la falla de una idea precisa puede ser más instructiva que el éxito de una idea confusa*'. Teorías y modelos sobre-simplificados pueden ser peligrosos: pueden ser irremediablemente generales o simplemente carentes de información.

Un concepto relacionado es la capacidad de prueba. Hay algunas teorías muy generales, como la teoría de la información, que no pueden ser sometidas a prueba a no ser que se les aplique a casos concretos. La teoría puede ser tan general que no puede ser probada como tal, y no puede derivarse un modelo susceptible de ser comprobado. Puede argumentarse que la teoría de la información no es realmente una teoría sino un método, así como las estadísticas o el análisis de sistemas. Pero aún si no es posible construir modelos comprobables de tales teorías y métodos, siempre será posible representarlos como diagramas, flujogramas e incluso modelos matemáticos complejos que terminan siendo modelos no comprobables de teorías no comprobables. Para evitar confusiones, a este tipo de modelos los llamaremos *representaciones*. Las representaciones sólo son símbolos de sus referentes teóricos, mientras que los modelos siempre simularán referentes de la realidad.

Las representaciones pueden ser muy útiles para clarificar y verificar la consistencia de una teoría, pero es sólo a través de modelos verificables que podemos comprobar su correspondencia con el referente real. Desde este punto de vista, un buen modelo debe estar diseñado para contener el máximo número de resultados que puedan ser cotejados con la realidad. En otras palabras, el constructor del modelo debe maximizar las posibilidades de falla. Un modelo libre de riesgos nos dirá muy poco acerca de fenómeno real o la teoría que se está probando, ya que sólo puede evitar el riesgo al eliminar resultados (outputs) que puedan ser comparados con la realidad.

Aparte del contenido teórico que el modelo pueda tener, debe considerarse el contenido teórico que el usuario del modelo puede apreciar. En el extremo más bajo encontramos a los modelos denominados caja-negra. Una caja-negra es un modelo en que sólo los terminales de entrada y salida son conocidos. El usuario sólo sabe cómo manipular los datos de entrada y cómo interpretar los resultados, algo así como las personas que miran un televisor. Dentro de la caja-negra puede haber modelos de cualquier contenido teórico, pero esto no es de interés para el usuario.

Desde este punto de vista se puede establecer un amplio rango de modelos, desde las cajas completamente negras, a cajas grises y finalmente cajas transparentes. Si una

caja negra es dividida en varias sub-cajas componentes, entonces el contenido teórico del modelo empieza a ser más explícito. Lo que se alimenta al modelo, los inputs, generalmente denominados *variables exógenas*, son datos que el modelo acepta como datos incuestionables (el canal que seleccionamos en la TV). Estos datos de entrada son procesados dentro de la caja, cualquiera sea el grado de negrura, hasta que los resultados salen por el otro lado (una figura en la pantalla). Todas las variables que son calculadas dentro de la caja se denominan *variables endógenas*. Si la caja es completamente negra, las únicas variables endógenas que el usuario podrá apreciar son los outputs, los resultados. Si la caja ha sido dividida en varias partes, el usuario podrá examinar variables endógenas intermedias, de las cuales sólo algunas formarán parte de los resultados.

Otro concepto clave es la *analogía*. Si no conocemos mucho acerca de algunos aspectos de la realidad, puede ser útil hacer una analogía con otro sistema real mejor conocido, sobre el cual tenemos sólidas teorías y modelos bien probados. En otras palabras, a falta de una teoría que explique el comportamiento de un determinado fenómeno, puede resultar conveniente ‘pedir prestada’ una teoría y/o un modelo derivado de otro sistema, porque pensamos que ambos comparten características importantes. Al principio es posible poner a prueba la teoría prestada como la encontramos, sin cambios, de tal manera que podamos verificar las principales diferencias con el sistema real que estamos modelando. Las diferencias encontradas darán lugar a mejoras, hasta que llegaremos a una teoría o modelo completamente nuevos, que era lo que estábamos buscando. Aunque tienen muchos partidarios y detractores, las analogías pueden ser muy útiles en el proceso de crear nuevos conocimientos, y de hecho su utilización es tan antigua como cualquier otro método científico. Debe tenerse claro que las analogías sólo proveen un punto de arranque en el desarrollo de nuevas teorías, y mientras antes nos alejemos de ellas, tanto mejor.

Los modelos pueden tener una gran variedad de formas, desde simples enunciados verbales, diagramas, gráficos, modelos físicos (icónicos), hasta modelos matemáticos. Los modelos matemáticos, a su vez, pueden ser determinísticos, probabilísticos o estocásticos. Los modelos determinísticos siempre darán los mismos resultados exactos de un input dado. Los modelos probabilísticos también darán los mismos resultados de inputs idénticos, pero le asigna determinadas probabilidades a cada resultado. El modelo estocástico dará resultados diferentes cada vez. Como se verá más adelante en este libro, muchos modelos pueden tener componentes probabilísticos o estocásticos como pasos intermedios, probabilidades pueden ser asignadas a variables estocásticas, y a su vez, valores determinísticos pueden obtenerse de probabilidades. Esto permite obtener los mismos resultados cada vez, pero con estimaciones del grado de error.

Hay ventajas bastante obvias en el uso de modelos altamente formalizados, porque permiten predicciones más precisas y relaciones más complejas. Como se mencionó, la mejor manera de describir los procesos sociales es a través de grandes bases de datos que sólo pueden ser manipuladas con matemáticas y computadores. Sin embargo, en la planificación urbana y regional suele ser difícil mantener un alto nivel de formalización a todo lo largo del proceso de análisis, porque no sabemos lo suficiente

sobre algunos componentes objeto de análisis, porque no tenemos suficiente información, o simplemente por debilidades teóricas. Como consecuencia, los planificadores y los científicos sociales pueden escoger una combinación de modelos con diferentes grados de formalización. A una imagen mental amplia del sistema social en su conjunto pueden seguirle modelos más formales con información no relacionada, como mapas, listados, diagramas, y otros. Algunos, como los diagramas, pueden contener relaciones simples, y la complejidad de los modelos puede crecer de manera gradual en la medida que incorporamos más relaciones funcionales.

La estructura del modelo también está afectada por las características del sistema de planificación. Debe establecerse una adecuada relación entre las variables exógenas del modelo y las verdaderas variables de control en el proceso de planificación. Por ejemplo, si una autoridad local de planificación tiene verdadero control sobre los usos del suelo, entonces el suelo deberá ser la única variable exógena del modelo. Esto, sin embargo, no siempre es posible, pero en general las variables exógenas que no están sujetas a control deben mantenerse al mínimo posible.

Como se verá más adelante, existe una estrecha relación entre simulación y evaluación, y como consecuencia, lo que se deja por fuera del modelo no puede ser evaluado. Por ejemplo, si el empleo de un cierto tipo o un grupo de población en particular no son modelados sino más bien dados exógenamente al modelo, entonces los efectos de cursos alternativos de acción no pueden ser evaluados, ya que por definición, los elementos exógenos no variarán su comportamiento dentro del modelo.

1.6 Dinámica de los modelos

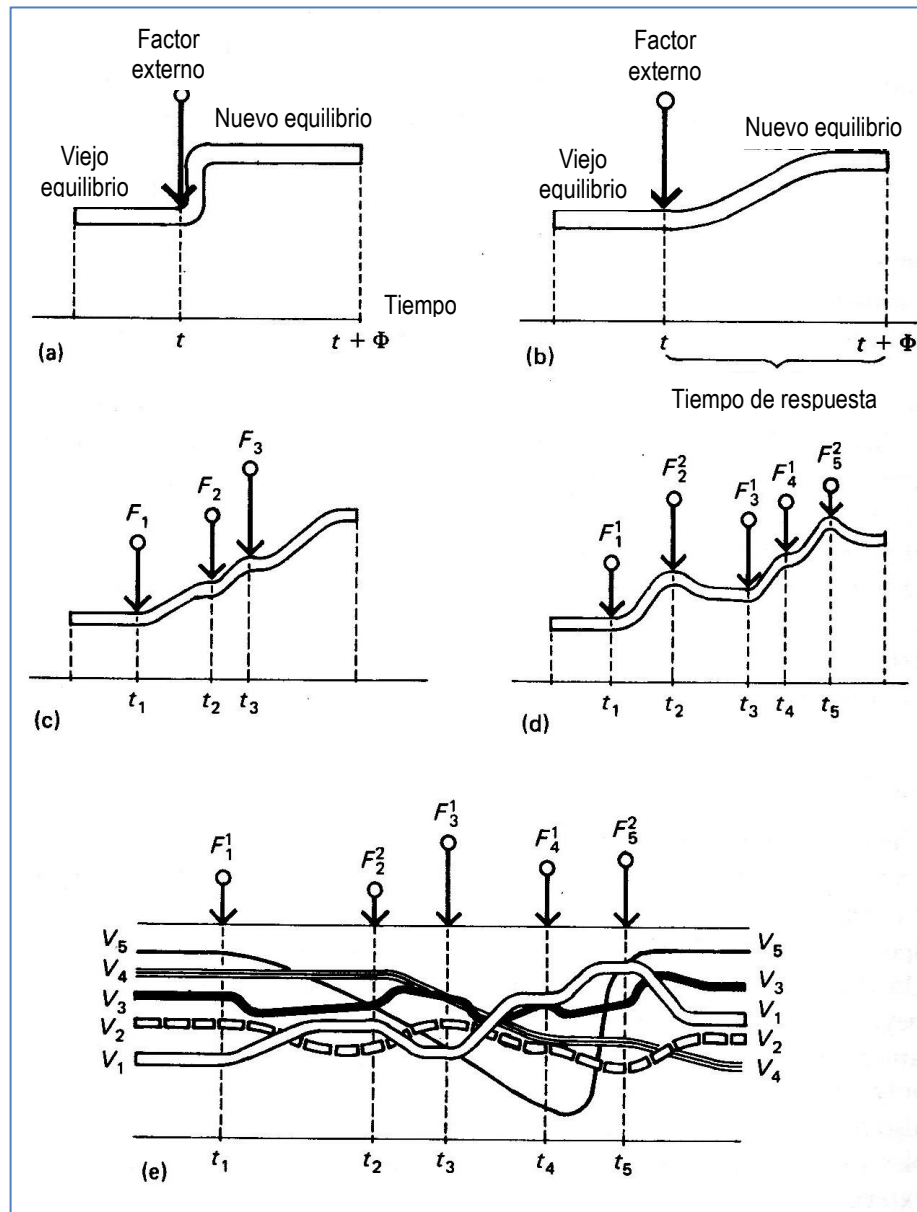
La escogencia del tipo de modelo a utilizar también está afectada por el ritmo de cambios del referente real. Si un elemento específico del sistema real es muy sensible a la influencia de otros elementos, y como consecuencia es de naturaleza muy cambiante, el modelo a utilizar deberá dar un tratamiento muy dinámico a este elemento. De igual manera, si algún elemento del sistema cambia lentamente, quizás más allá del horizonte de planificación, entonces su representación en el modelo puede ser más estática, e incluso puede ser un dato exógeno.

Un concepto fundamental en dinámica de sistemas, muy relevante en los sistemas urbanos y regionales, es el *tiempo de respuesta*. Considérese un sistema que se encuentra en equilibrio dinámico, esto es, un sistema que no cambiará en el tiempo, a no ser que lo afecte un estímulo externo en un punto particular en el tiempo t . La Figura 1-3 presenta varios ejemplos de sistemas dinámicos de este tipo. La Figura 1-3(a) presenta un caso en que un factor externo genera un cambio instantáneo. La Figura 1-3(b) muestra un ejemplo en que el sistema se toma algún tiempo para reaccionar al estímulo externo y alcanza un nuevo estado estable de manera gradual, en vez de instantáneamente. El tiempo que demora el sistema para alcanzar el nuevo equilibrio se llama *tiempo de respuesta*.

Los factores externos pueden actuar en varios instantes en el tiempo, tales como t_1 , t_2 y t_3 en la Figura 1-3(c), y pueden tener distintas magnitudes, tales como F_1 , F_2 y F_3 . La

curva simbólica representa el comportamiento del sistema al pasar del estado de equilibrio anterior al nuevo. En este ejemplo F_1 , F_2 y F_3 son de naturaleza similar porque el efecto sobre el sistema es siempre positivo. Cuando estos factores externos son de naturaleza diferente, el efecto que producen es el que se presenta en la Figura 1-3(d), donde F_t^n representa un factor tipo n que actúa en el tiempo t . En el ejemplo los factores tipo $n=1$ tienen un efecto positivo, mientras los tipo $n=2$ tienen un efecto negativo.

Si el sistema se define como un conjunto más complejo de variables, factores externos del mismo tipo pueden tener efectos muy diferentes sobre las variables, caso que se considera en la Figura 1-3(e). Hay cinco variables V_1 a V_5 , y cada una tiene un comportamiento diferente respecto a los mismos impulsos externos. En el ejemplo, V_1 es afectada positivamente por los factores tipo 1 y negativamente por los factores tipo 2. La variable V_2 tiene exactamente el comportamiento contrario. La variable V_3 presenta un comportamiento más complejo, con el mismo comportamiento de la variable V_2 pero con reacciones internas ante la variable V_1 . Los tiempos de respuesta también varían: la variable V_1 responde más rápido que la V_2 . La variable V_4 no es afectada por los estímulos externos de los factores de tipo 1, pero muestra una reacción negativa a los factores tipo 2. Finalmente V_5 es afectada negativamente por todas las variables externas hasta llegar a un punto bajo, desde el cual se levanta repentinamente. Este último tipo de variable ha sido estudiado en análisis de umbrales y teoría de catástrofe. El análisis de umbrales (Malisz, 1969) explora diversos tipos de reacciones, verificando que algunas variables, particularmente las relacionadas a costos, suelen mostrar importantes discontinuidades en determinados puntos.

Figura 1-3: Factores externos que afectan la dinámica del sistema

La representación del comportamiento dinámico de las variables puede tener un tratamiento continuo o proceder en intervalos discretos. Generalmente se prefiere a la dinámica discreta porque las series de datos están casi siempre disponibles en intervalos discretos. Dentro del enfoque discreto, hay dos tipos principales de modelos: con dinámica endógena y con dinámica exógena, las cuales se presentan en la Figura 1-4.

La Figura 1-4(a) muestra un sistema con dinámica endógena, en el cual el conjunto de variables cambia como una función de un estado previo $t-1$. Naturalmente se debe

informar al modelo cómo estas variables cambian de un período al siguiente, tales como tasas de crecimiento respecto a información del pasado. La Figura 1-4(b) presenta un caso de dinámica exógena, en el cual el sistema cambia sólo en función de cambios en las variables exógenas. En un sistema urbano o regional, se encontrarán estos dos tipos de dinámica actuando simultáneamente, como se muestra en la Figura 1-4(c). En este caso hay variables exógenas que cambian en el tiempo y afectan al sistema en cada período discreto, y también hay variables endógenas que son una función del período anterior. Nótese que se ha considerado la posibilidad que el estado del sistema en cada período de tiempo afecte las variables externas del período siguiente (flechas diagonales).

Los factores exógenos son elementos fuera del sistema que estamos considerando, que pueden ser componentes del sistema a un nivel jerárquico más alto (por ejemplo, una región para una ciudad), o elementos al mismo nivel que han sido excluidos de la definición del sistema (por ejemplo elementos socioeconómicos o culturales complejos). Los elementos endógenos responden a factores dinámicos que ocurren dentro del sistema, tal como ha sido definido.

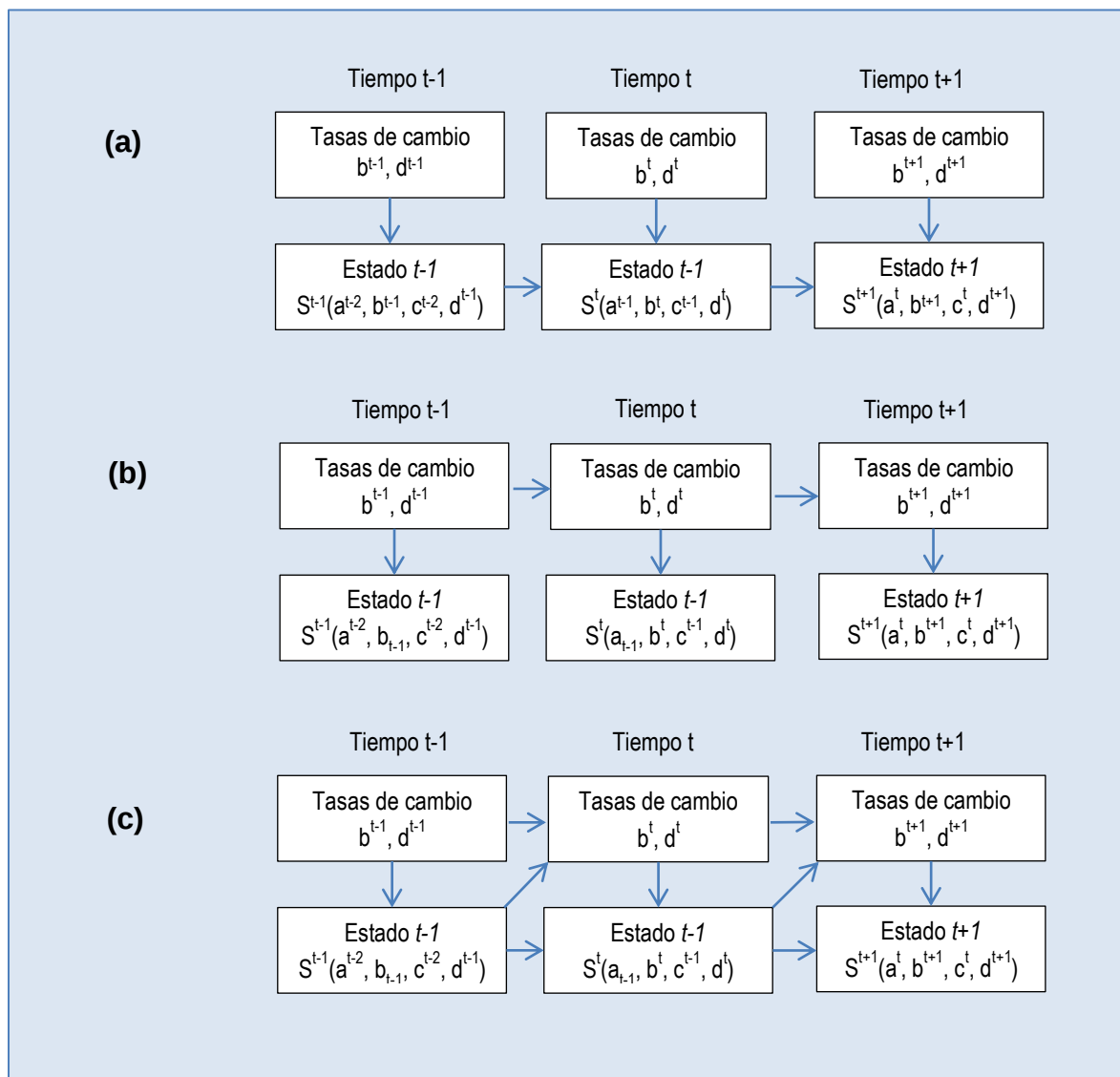
Sin embargo, tanto factores exógenos como endógenos producirán efectos en el sistema con distintos tiempos de respuesta, y se puede decir que en general la velocidad en que lo hacen dependerá de la velocidad de los actores involucrados. Por ejemplo, una persona que conduce un automóvil desde A hasta B toma diariamente una decisión acerca de la ruta más conveniente a seguir. Si repentinamente la vía se cierra o aparece otra vía más conveniente, el conductor cambiará su ruta casi inmediatamente. En este caso el tiempo de respuesta será muy corto. Si, en cambio, se trata de migrar de una ciudad a otra, el tiempo de respuesta puede ser considerablemente más largo.

1.7 Conclusiones

Este capítulo hizo énfasis en cuestiones epistemológicas y metodológicas. Comenzó por argumentar que en las últimas décadas ha habido un proceso de acercamiento entre las ciencias naturales y las ciencias sociales, que hemos denominado proceso de convergencia. Teniendo esto en mente, se presentó el método científico general concebido por Popper, que luego adaptamos a las ciencias sociales. Se demostró que la propuesta de Popper no sólo es aplicable a las ciencias sociales, sino también para explicar los procesos sociales en general. Puede utilizarse para explicar la manera en que las personas toman sus decisiones en el día-a-día y cómo interactúan con su entorno social. Se discutió en más detalle dos casos especiales: el científico social y el planificador.

También se argumentó que uno de los elementos clave en el proceso de investigación en ciencias sociales es el uso de modelos, ya que le permiten al analista el hacer experimentos, que serían imposibles de realizar en el mundo real. Esto explica la creciente importancia de los modelos, no sólo como una herramienta para evaluar políticas en planificación, sino también como método para probar (o refutar) las teorías en las ciencias sociales.

Figura 1-4: Dinámica (a) endógena, (b) exógena y (c) mixta



2 Teorías microeconómicas de los usos del suelo

Los primeros modelos que intentaron explicar la distribución espacial de las actividades se basaron en teoría microeconómica. Dos preguntas relacionadas entre sí fueron su principal preocupación: ¿cuál es la racionalidad que determina la localización de actividades?, y ¿cómo surgen de este proceso la renta del suelo? Los modelos que se desarrollaron a partir de estas cuestiones adoptaron los principios de la economía clásica y neoclásica.

En este enfoque, la localización de actividades es vista como un mecanismo de mercado que combina tres elementos básicos: productos, suelo y transporte. Por una parte, se requiere suelo para desarrollar las actividades productivas o para satisfacer las necesidades residenciales. Por otra parte, se requiere transporte para transportar excedentes de producción o trabajo. Un agricultor, por ejemplo, necesita vender su producción excedentaria en el mercado, y el residente de una ciudad requiere vender su trabajo donde hay una demanda para ello. El proceso de intercambio requiere transporte, ya sea de mercancías al mercado, o residentes a los lugares de trabajo.

El suelo es considerado como una gran planicie homogénea sin rasgos distintivos, e infinitamente disponible, de tal manera que, en principio, no hay ninguna razón para pagar por él. Lo que le da al suelo una cualidad diferencial es el costo de transporte o accesibilidad, que es el principal generador de los valores del suelo.

Las teorías microeconómicas del uso del suelo examinan el proceso de localización y renta desde el punto de vista del residente individual o empresa productora. Estas actividades compiten por el consumo de suelo, y una vez alcanzado el equilibrio, habrán escogido una parcela de determinado tamaño y ubicación, tal que el costo de transporte y la renta de la tierra que deben pagar optimicen su utilidad. Así, la competencia determinará el precio o renta del suelo en cada localización y el precio de las mercancías en el mercado.

La distancia entre unos productores agrícolas y el mercado es tomada como ejemplo en la teoría de localización de von Thünen (1826), que explica la forma en que los costos de transporte afectan a los productores y consumidores, determinan el proceso de localización y renta, y el precio de los productos en el mercado. El transporte es utilizado, también, por Weber (1909) como un elemento importante para explicar la localización industrial con respecto al mercado de los productos industriales, aunque en este caso no hace explícito el consumo de suelo. Christaller (1933) y Lösch (1940) utilizaron un concepto similar para explicar la formación de áreas de mercado y su configuración geométrica para crear regiones. Wingo (1961) y Alonso (1964) explicaron el caso urbano, en que residentes y empresas compiten por el uso del suelo, generando un patrón de localizaciones y rentas alrededor de un único centro de empleo. Versiones más elaboradas de estos modelos fueron propuestas por Muth (1968) y Mills (1969).

En este capítulo se hace una revisión de parte de este trabajo. El modelo de von Thünen se toma como base para llegar al esqueleto de la microeconomía espacial, extendiendo el modelo original de diversas maneras. Luego se describen los modelos de Wingo y Alonso, pero se argumenta que una versión ampliada del modelo original de von Thünen puede ser tan general como estas versiones más modernas. Al final se presentan los modelos de Christaller y Lösch, para explicar cómo se forman y estructuran regiones con múltiples centros.

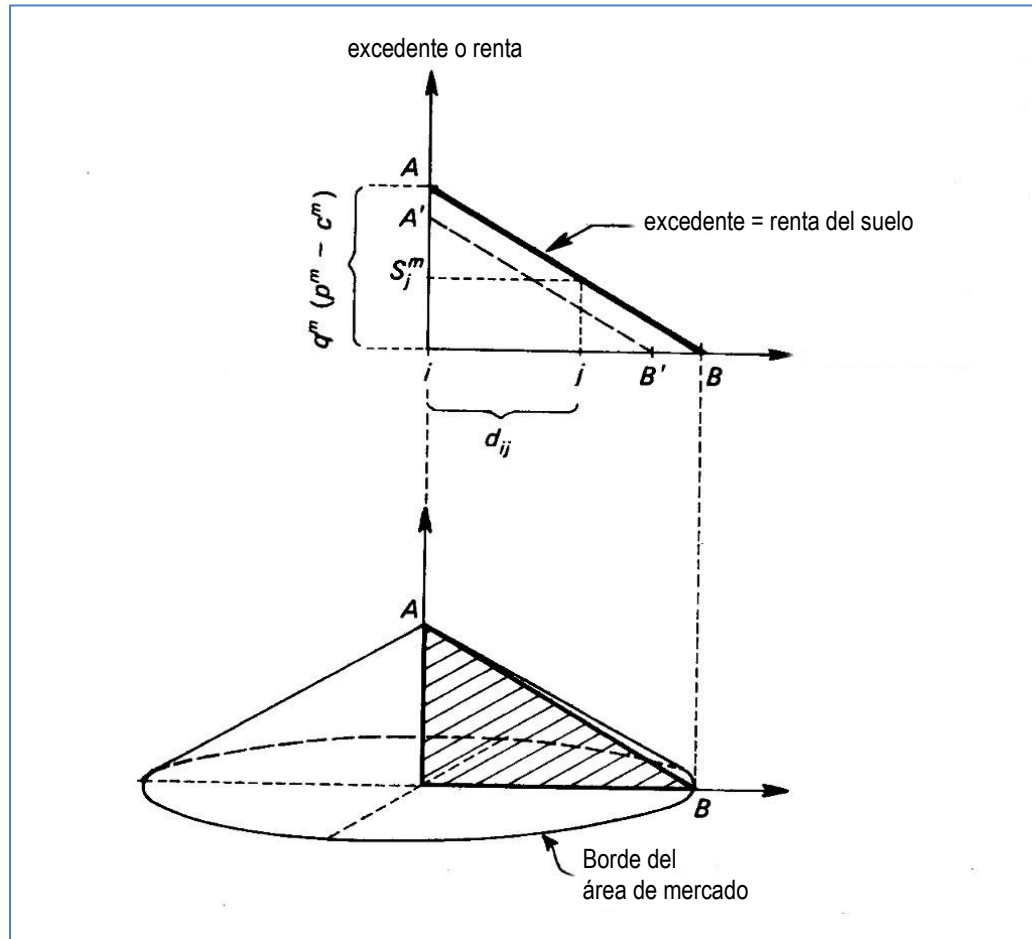
2.1 El estado aislado de Von Thünen

Von Thünen hizo el primer intento para explicar el efecto de los costos de transporte en la localización de actividades y el funcionamiento del mercado de suelo. Para ello utilizó como ejemplo base una región agrícola idealizada, al centro de la cual hay un único mercado, en el cual un gran número de productores quieren vender sus productos. El suelo pertenece a un gran número de propietarios, que están dispuestos a alquilar su tierra al mejor postor, eso es, al productor que está dispuesto a pagar la renta lo más alta posible. El modelo de von Thünen incluye una serie de otros supuestos simplificativos:

- El sistema considerado está cerrado (estado aislado) sin interacciones con otras regiones, y una vez alcanzado el equilibrio, ningún actor entra o sale del sistema
- El suelo es homogéneo respecto a fertilidad, productividad y transporte, esto es, el costo de transporte por unidad de distancia es constante en cualquier dirección
- Hay un gran número de productores que quieren maximizar sus ganancias, y un gran número de terratenientes que tratan de maximizar su renta, y por lo tanto ningún actor puede controlar los precios
- Entrar o salir del sistema no tiene costo alguno

Sobre la base de estos supuestos, von Thünen procede a analizar las condiciones del mercado de suelo para cada productor individual. La Figura 2-1 muestra el caso más sencillo con un sólo producto y un sólo mercado ubicado en el punto i .

Figura 2-1: El modelo de un solo producto de von Thünen



El excedente al productor, S_j^m de la única mercancía m en un punto en particular j a una distancia d_{ij} del mercado, dependerá de la cantidad producida y del precio obtenido en el mercado, es decir:

$$S_j^m = q^m(p^m - c^m - k^m d_{ij}), \quad (2-1)$$

donde q^m es la cantidad del producto m producido por unidad de suelo, p^m es el precio de la mercancía m en el mercado, c^m es el costo de producción de cada unidad del producto m , k^m es el costo de transporte por distancia de cada unidad de producto m y, como sabemos, d_{ij} es la distancia entre el productor en j y el mercado en i .

La Ecuación (2-1) es una función lineal (línea AB en la Figura 2-1) que decae de un máximo (punto A) cuando la distancia al mercado es cero, esto es, cuando $S_j^m = q^m(p^m - c^m)$ hasta un mínimo (punto B) cuando $S_j^m = 0$, esto es, cuando el costo de transporte es igual a $p^m - c^m$. Más allá de este punto el costo de producción más el costo de transporte excede el precio en el mercado, tal que los productores abandonan.

Los terratenientes, por su parte, alquilarán sus propiedades al mejor postor. En una localización dada j los productores competirán para asegurarse que la tierra les es asignada. Cada productor intentará vencer a los demás en la subasta, aumentando la apuesta de dinero que está dispuesto a pagar por la tierra, pero sólo hasta el límite máximo que es S_j^m . Esto se parece mucho a lo que Alonso mucho después (1964) llamó el precio-apuesta (*bid Price*). Los terratenientes no pueden incrementar el precio más allá de este valor porque preferirán abandonar el mercado antes que operar a pérdida. En consecuencia el perfil de renta de la región (línea AB) se corresponde exactamente al perfil de excedentes. Si rotamos la línea AB alrededor de su eje se genera un círculo con centro en i que representa el área en que se produce el producto m .

La Figura 2-1 también muestra el efecto que tiene una reducción en el precio del producto m sobre el excedente y la renta de la tierra. El resultado es que la curva AB se desplaza a A'B', siendo AA' la reducción en el precio.

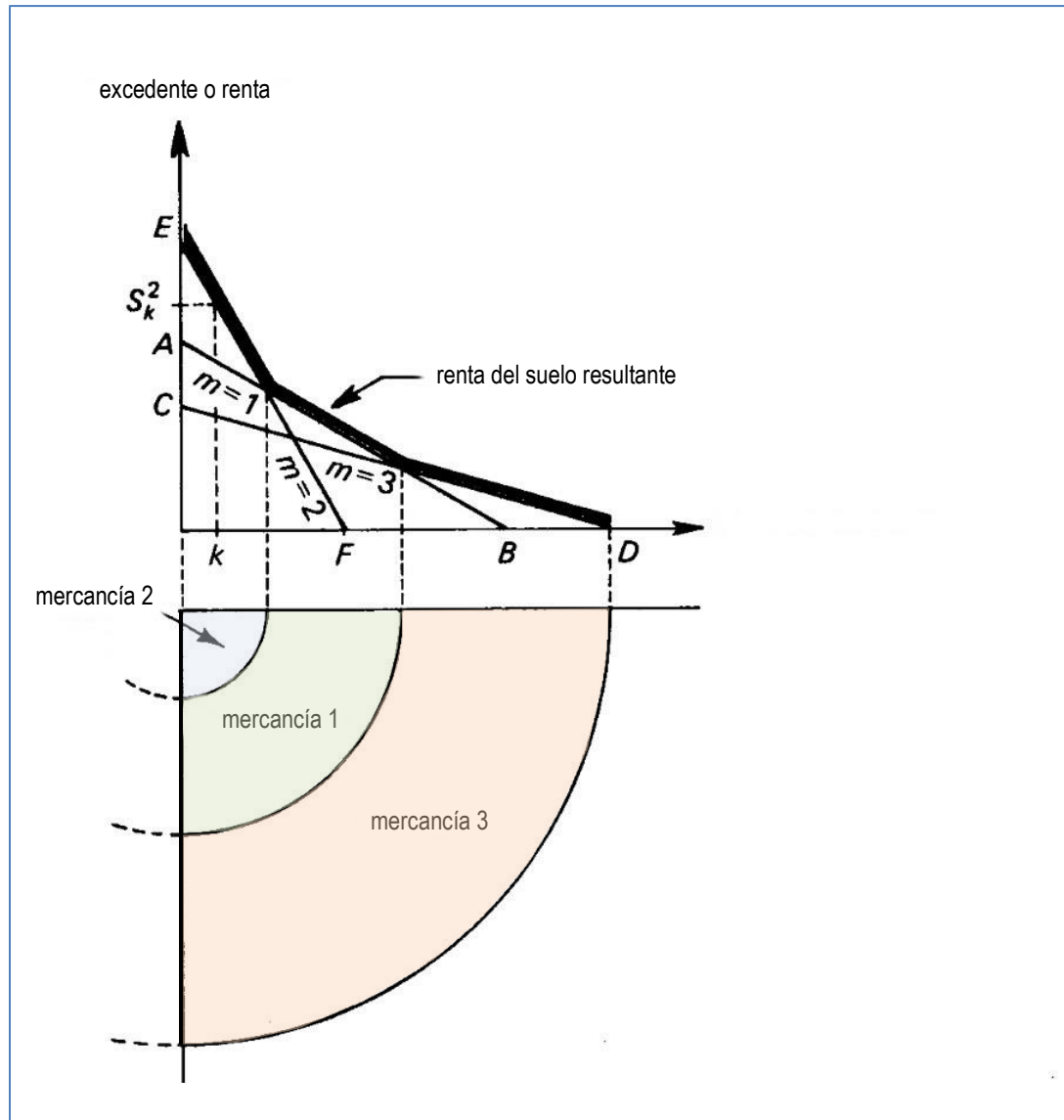
Hasta aquí sólo se ha considerado una mercancía. Si se introducen productores de otras mercancías, los terratenientes alquilarán sus propiedades al productor de la mercancía que genere el mayor excedente, ya que éstos serán los que estarán dispuestos a pagar las rentas más altas. La Figura 2-2 muestra los perfiles de excedente para tres mercancías $m = 1, 2, 3$. Cada una tiene una pendiente diferente, dependiendo entre el costo de transporte y el rendimiento del producto. La curva EF, por ejemplo, es más empinada que la AB, porque el costo de transporte por unidad de distancia de la mercancía 2 es mayor que el de la mercancía 1. El precio de la mercancía 2 en el mercado es mayor que el de la mercancía 1, y por lo tanto intercepta la abscisa en un punto más alto, en el punto E en vez de A.

Los productores de estas mercancías compiten por el suelo. En una localización muy cercana al centro, digamos el punto k , los terratenientes pueden elegir entre cualquiera de los tres productores para asignarle la tierra. Debido a que el excedente del productor de la mercancía 2 es el más alto en este punto, los terratenientes asignarán la tierra a éstos, y recibirán una renta equivalente a S_k^2 . A medida que nos alejamos del centro, la mercancía 2 seguirá generando un excedente mayor que las demás, con lo cual los terratenientes les asignarán la tierra a estos productores, hasta que llega un punto en que la curva de excedente de la mercancía 2 intercepta la de la mercancía 1. Toda la tierra hasta este punto de intersección será asignada a los productores de la mercancía 2, de tal manera que ocuparán un círculo de tierra alrededor del mercado. Más allá de esta frontera, son los productores de la mercancía 1 los que estarán dispuestos a pagar más, de tal manera que la tierra les será asignada a ellos, hasta que su perfil de excedente intercepta el de la mercancía 3. De allí en adelante los mayores postores serán los productores de la mercancía 3, hasta que finalmente se llega al margen. El perfil de la renta de la tierra resultante será el de la línea quebrada ED, y los usos del suelo formarán anillos concéntricos alrededor del mercado.

Como puede verse, para cada mercancía habrá una localización en el margen donde su producción se detiene, que es al mismo tiempo la localización más cercana al mercado de la mercancía siguiente a lo largo de la cadena. El precio de la tierra en el mar-

gen de una mercancía será igual al precio de la tierra más cercana al mercado para la mercancía siguiente.

Figura 2-2: El modelo de Von Thünen con varias mercancías



2.2 Calculando el modelo básico de von Thünen

Para calcular el modelo se requieren los siguientes datos:

M número de mercancías

- q^m cantidad de suelo requerida para producir una unidad de la mercancía m
- k^m costo de transportar una unidad de mercancía m por unidad de distancia
- c^m costo de producción de una unidad de mercancía m
- D^m demanda total por el producto m en el mercado

Con estos datos, el modelo debe calcular la renta del suelo en cada punto, la localización en el margen y el precio de cada mercancía. El procedimiento procede con los siguientes pasos:

- (a) Calcular la pendiente de la curva de excedente/renta de cada mercancía, que es:

$$s^m = k^m / q^m \quad (2-2)$$

- (b) Ordenar las mercancías por la pendiente, tal que $s^1 > s^2 > s^3 \dots > s^M$
- (c) Calcular el área A^m que requiere cada mercancía para su producción, como la demanda de cada producto multiplicado por el consumo unitario de suelo:

$$A^m = D^m q^m \quad (2-3)$$

- (d) Calcular la distancia al margen de cada mercancía. Como éstas se ubican en anillos concéntricos alrededor del mercado, el radio de la primera mercancía, es decir, la mayor pendiente de excedente, puede calcularse con la fórmula estándar de la superficie de un círculo. La segunda distancia al margen será el radio de un círculo con área igual a la primera mercancía más la de la segunda, y así sucesivamente. Para cualquier mercancía m la distancia al margen será:

$$d_i^m = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^m A^n \right) / \pi} \quad (2-4)$$

- (e) Calcular la renta de la tierra en el margen y el precio de cada mercancía. Para la última mercancía la renta de la tierra en el margen será cero, y el precio será:

$$p^M = k^M d^M + c^M \quad (2-5)$$

Este será el punto de arranque del cálculo, que procederá desde la última mercancía hasta la primera. Para una mercancía cualquiera m , la renta en el margen S^m será:

$$S^m = \frac{p^{m+1} - c^{m+1} - k^{m+1} d^{m+1}}{q^{m+1}} \quad (2-6)$$

y el precio será:

$$p^m = S^m q^m + c^m + k^m d_i^m \quad (2-7)$$

Finalmente la renta en el centro será:

$$S_0 = \frac{p^1 - c^1}{q^1} \quad (2-8)$$

La Figura 2-3 muestra tres ejemplos, correspondientes a una, dos y tres mercancías, incluyendo los inputs y los outputs. El Ejemplo (a) tiene una sola mercancía, sorgo. Los valores resultantes tales como la pendiente de la curva de excedente, el área, la distancia al mercado en el margen, pueden ser verificados fácilmente.

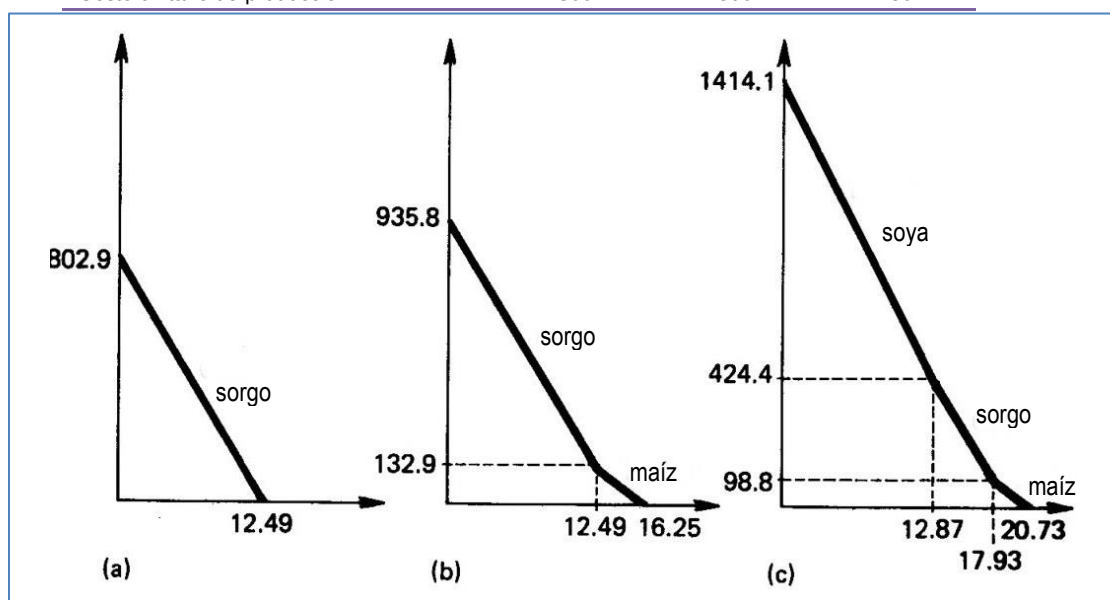
El Ejemplo (b) supone que una segunda mercancía entra al mercado, maíz. Esto afecta al sistema previo de varias maneras. Como la relación entre el costo de transporte y el rendimiento (Ecuación (2-2)) para el maíz es menor que para el sorgo, los productores de maíz se ubicarán en un anillo concéntrico más afuera. El área cultivada se extenderá del radio original de 72.49 unidades a 76.25 para darle cabida al nuevo producto. La renta de la tierra se incrementará en todas las localizaciones y el precio del sorgo, que antes era 862, ahora será 993. La diferencia en precio será transferida a los terratenientes en forma de renta.

El Ejemplo (c) muestra lo que ocurre cuando se introduce una tercera mercancía: soya. Dado que esta nueva mercancía tiene la relación costo de transporte/rendimiento más alta, se ubica en el centro, quitándole la tierra al sorgo y alejándolo del centro. Los valores del suelo se incrementan considerablemente, como también los precios y el área cultivada.

Este ejemplo puede aplicarse a cualquier proceso de evolución de un sistema socio-espacial. A medida que la sociedad se desarrolla, entran más mercancías al mercado, hay más demanda por los productos y los valores del suelo se incrementan.

Figura 2-3: Ejemplo numérico del modelo de Von Thünen

Inputs	(a)	(b)	(c)
Número de mercancías	1	2	3
Mercancía incorporada	sorgo	maíz	soya
Rendimiento	0.7	0.85	0.65
Costo unitario de transporte	45	30	50
Demanda en el mercado	700	400	800
Costo unitario de producción	300	500	250



Outputs	(a)	(b)	(c)
Pendiente curva excedente/renta			
sorgo	64.29	64.29	64.29
maíz	-	35.29	35.29
soya	-	-	76.92
Area cultivada			
sorgo	490	490	490
maíz		340	340
soya			520
Total	490	830	1350
Distancia al margen			
sorgo	12.49	12.49	17.93
maíz		16.25	20.73
soya			12.87
Renta en el margen			
sorgo	0	132.9	98.8
maíz		0	0
soya			424.4
Renta en el centro			
	802.9	935.8	1414.1
Precio de las mercancías			
sorgo	826	955	1176
maíz		987.6	1121.9
soya			1169.1

2.3 Extendiendo el modelo de von Thünen con elasticidades

2.3.1 Elasticidad de la demanda

En el ejemplo anterior la demanda por cada producto era fija y un input al modelo. A medida que se incrementaba el número de mercancías, los precios de las mismas se incrementaban, pero la demanda seguía inalterada. Un supuesto más realista es que a medida que los precios se incrementan, la demanda baja, un fenómeno conocido como *elasticidad* y de gran importancia en economía. Las demandas fijas, entonces, deben ser reemplazadas por funciones como la que se muestran en la Figura 2-4. Como las cantidades consumidas se reducirán a medida que el precio aumenta, las curvas tendrán pendiente negativa. La velocidad en que se reduce la demanda dependerá tanto de la mercancía como del tipo de consumidor. Así, la población de bajos ingresos tendrá elasticidades altas respecto a la mayoría de las mercancías. Si el consumo de una mercancía se considera esencial, la elasticidad será baja. En el ejemplo anterior el consumo de todas las mercancías se consideraron como *inelásticas*.

Hay muchas formas matemáticas para representar una función de demanda elástica, siempre que sea de pendiente negativa. Una función lineal con pendiente negativa sería la forma más simple, pero una función con pendiente constante es poco realista, debido al principio de *rendimientos decrecientes*, que dice que la satisfacción obtenida por el consumo de cada unidad adicional tiende a reducirse. Esto quiere decir que, aún si el precio de una mercancía se reduce casi a cero, la cantidad consumida no pasará más allá de un valor máximo. A medida que el precio aumenta, la demanda se reduce rápidamente al principio, más despacio después, haciéndose asintótica a cero en algún punto, dependiendo de la mercancía y del consumidor.

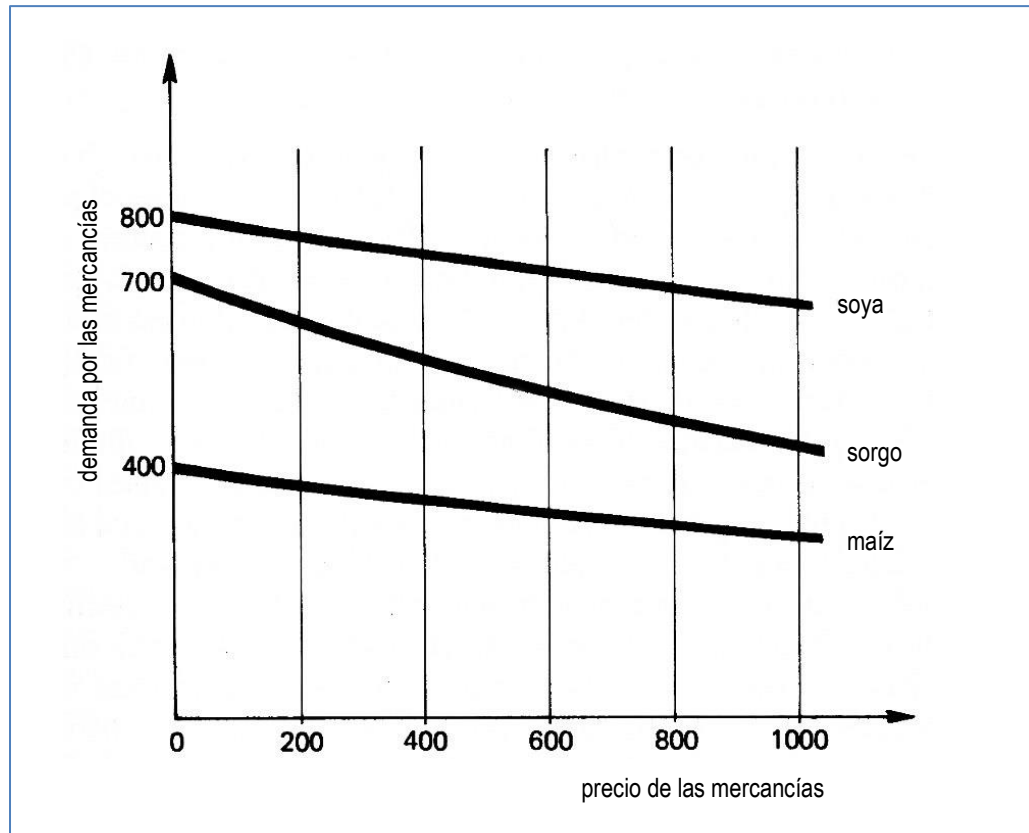
Las funciones más comúnmente utilizadas son la potencial y la exponencial. Una función potencial decae conveniente a cero, pero no tiene un límite superior, lo cual quiere decir que si el precio tiende a cero, el consumo tiende a infinito. Una función exponencial converge a cero, pero tiene un límite superior, lo cual hace que sea la función a escoger.

Regresando al punto anterior, las demandas exógenas deben ser reemplazadas por funciones de demanda de la siguiente forma:

$$D^m = \rho^m \exp(-\tau^m p^m) \quad (2-9)$$

Donde D^m es la cantidad demandada del producto m dado que el precio es p^m y donde ρ^m es un parámetro dado que representa la cantidad máxima a consumir si el precio es cero y τ^m es la elasticidad. Así, si el precio p^m es cero, entonces $\exp(-\tau^m p^m) = 1$ y por lo tanto $D^m = \rho^m$. En el otro extremo, si p^m es muy grande, $\exp(-\tau^m p^m) \rightarrow 0$. Por otra parte, si $\tau^m = 0$, entonces D^m será constante e igual a ρ^m , una línea horizontal que representa el caso totalmente inelástico, que corresponde a los ejemplos anteriores a éste.

Figura 2-4: Funciones de demanda elásticas para extender el modelo de von Thünen



Para calcular el modelo, además de cambiar la demanda dada por los parámetros ρ^m y τ^m , el procedimiento sería así:

- Iniciar el precio de todas las mercancías en cero. Esto es necesario porque al inicio no se conocen los precios.
- Calcular la demanda por cada mercancía, aplicando la ecuación (2-9).
- Calcular los pasos a) a e) de la sección previa. Esto determinará la pendiente de las curvas de excedente para cada mercancía, y por lo tanto el orden en que se localizarán alrededor del mercado. También permite calcular el área, la distancia en el margen y el precio de cada producto, que ya no serán cero.
- Evaluar la convergencia. Si se ha logrado, el cálculo ha terminado. De lo contrario regresar al paso b)

En el paso b) la demanda fue calculada en función de los precios, que fueron fijados inicialmente en cero ($D^m = \rho^m$). Al final del paso c) se calcula un nuevo conjunto de precios, que afectará la demanda. El proceso de cálculo se hace iterativo, repitiendo la secuencia de cálculo una y otra vez. A medida que se hacen más iteraciones, los precios subirán y la demanda se reducirá continuamente, pero debido a la forma de

las curvas de demanda con pendientes negativas, se llega a un punto en que los valores cambian muy poco con respecto a la iteración anterior. Este es el punto en el cual se debe detener el proceso de cálculo, lo cual se conoce como *convergencia*.

Para medir el grado de convergencia, se debe seleccionar una variable como indicador, preferiblemente una variable que esté afectada por todas las demás. La cantidad total de suelo consumido parece la selección obvia, ya que los productores de todas las mercancías consumen suelo. La diferencia porcentual de la cantidad de suelo total consumido al final de cada iteración respecto al de la iteración previa se utiliza como indicador de convergencia, y debe ser comparado con un criterio de convergencia dado (target).

La Figura 2-5 muestra el mismo ejemplo de la Figura 2-3 pero con elasticidad de la demanda por las mercancías. Las demandas del ejemplo anterior son tomadas como valores máximos (ρ^m) y se agregaron valores para los parámetros de elasticidad (τ^m). Las funciones de demanda ilustradas en la Figura 2-4 corresponden, de hecho, a estos valores.

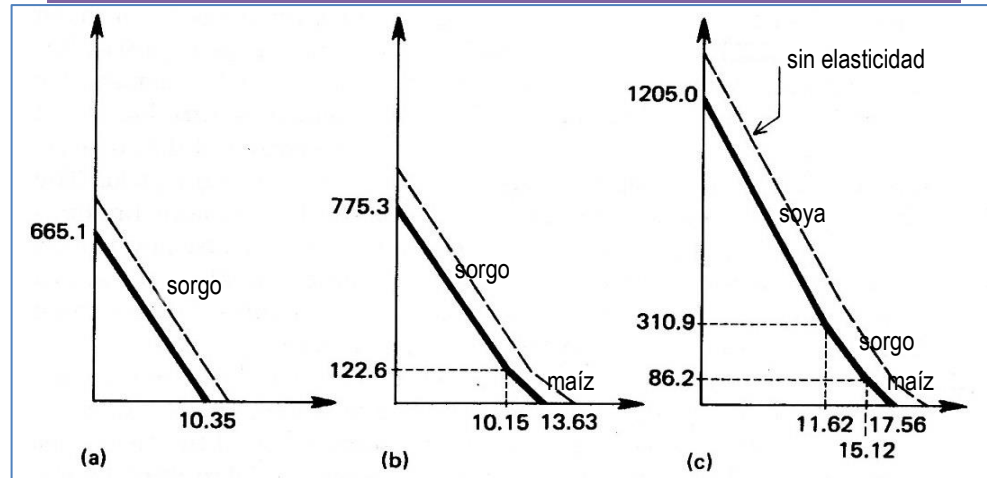
La principal diferencia entre este ejemplo y el anterior es que las cifras de demanda son, ahora, endógenas y se reducen en la medida que se incrementan los precios. Así, por ejemplo, en la Figura 2-3(a) la demanda por sorgo estaba fija en 700 unidades, y en este ejemplo cae a 480.4. Cuando se introduce el maíz, cae más hasta 462.6 y a 419.6 cuando se introduce la soya. Todas las demás variables se ven también afectadas, excepto las pendientes de las curvas de excedente/renta que sólo dependen de los costos de transporte y los rendimientos. El orden de las mercancías en torno al mercado permanece, por lo tanto, inalterado. Las áreas cultivadas y las distancias al mercado se reducen porque ahora hay que producir menos de cada mercancía. La renta o precio del suelo se reduce en la medida en que los consumidores reducen sus demandas en respuesta a los precios. Todos los casos convergieron después de 3 iteraciones para alcanzar un criterio de convergencia de 1%.

La principal conclusión que debe agregarse cuando se introducen las elasticidades en el consumo de las mercancías es que, a medida que un mayor número de mercancías se une al sistema, las personas consumen algo menos de la mercancía anterior para poder consumir las nuevas (sustitución). El grado en que esto ocurre depende de los parámetros de elasticidad, una relación que en economía se conoce como *elasticidades cruzadas*.

Desde el punto de vista matemático, la introducción de elasticidades conduce a un procedimiento iterativo porque el sistema deja de ser lineal. Estos algoritmos iterativos pueden ser muy poderosos para resolver estos sistemas no-lineales de manera simple y computacionalmente eficiente. Por esta razón en este libro se utilizan algoritmos iterativos extensamente.

Figura 2-5: Modelo de von Thünen con consumos elásticos de mercancías

Inputs	(a)	(b)	(c)
Número de mercancías	1	2	3
Mercancía incorporada	sorgo	maíz	soya
Rendimiento	0.7	0.85	0.65
Costo unitario de transporte	45	30	50
Demanda máxima (ρ^m)	700	400	800
Elasticidad de la demanda (τ^m)	0.0005	0.0003	0.0002
Costo unitario de producción	300	500	250

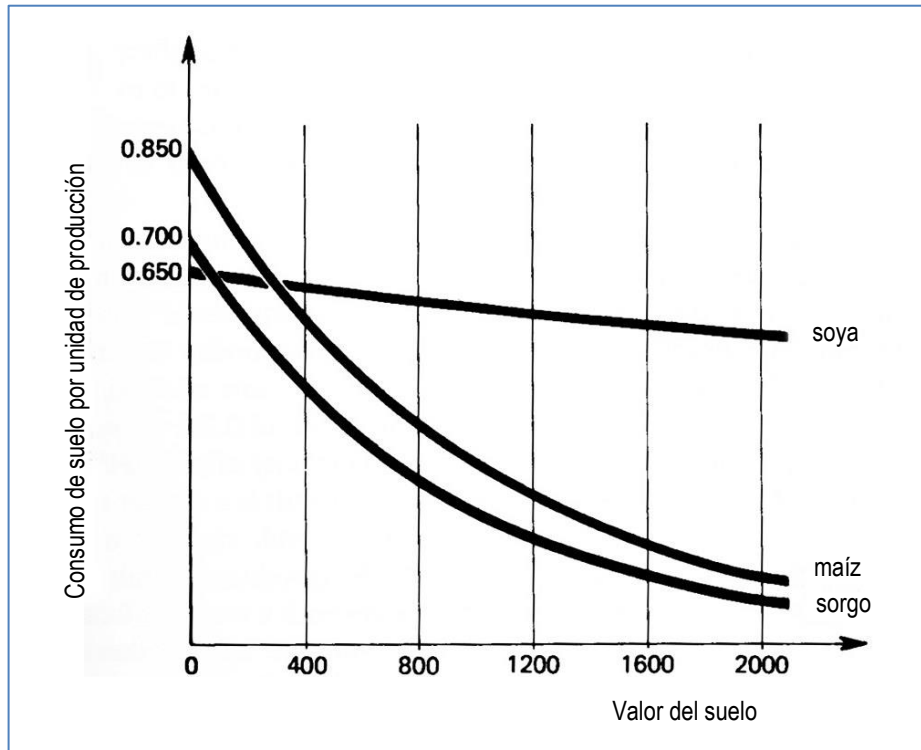


Outputs	(a)	(b)	(c)
Pendiente curva excedente/renta			
Sorgo	64.29	64.29	64.29
Maíz	-	35.29	35.29
Soya	-	-	76.92
Area cultivada			
Sorgo	336	324	294
Maíz		260	251
Soya			424
Total	336	584	969
Distancia al margen			
Sorgo	10.35	10.15	10.12
Maíz		13.63	17.56
Soya			11.62
Renta en el margen			
Sorgo	0	122.6	86.2
Maíz		0	0
Soya			310.9
Renta en el centro			
	665.1	775.3	1205.0
Precio de las mercancías			
Sorgo	765.6	842.7	1040.7
Maíz		908.8	1026.8
Soya			1033.2
Demanda por mercancías			
Sorgo	480.4	462.6	419.6
Maíz	-	305.4	295.0
Soya	-	-	652.9

2.3.2 Elasticidad en el consume de suelo

En los ejemplos anteriores, la cantidad de suelo requerido para producir una unidad de cada producto era fija y dada exógenamente al modelo. Un supuesto mucho más realista es que, a medida que el precio del suelo se incrementa, los productores invertirán más en maquinaria y fertilizantes para aumentar la productividad de cada unidad de suelo. Los productores de algunas mercancías podrán hacer esto más que otros, como se muestra en la Figura 2-6, por razones tecnológicas.

Figura 2-6: Funciones elásticas de demanda de suelo para extender el modelo de von Thünen



Esto quiere decir que ahora, en lugar de rendimientos fijos y dados para cada producto, podemos introducir funciones de demanda de suelo. La cantidad de suelo para producir una unidad de producto de una determinada mercancía será máxima cuando la renta es cero, y decaerá a medida que los valores del suelo se incrementan. En este caso, sin embargo, es necesario introducir un mínimo por debajo del cual por más maquinaria y fertilizantes que se introduzcan no se podrá incrementar más el rendimiento. Si se adopta una curva exponencial con pendiente negativa, la función de demanda de suelo será:

$$L^m = l^m \exp(-\delta^m \check{S}^m), \text{ sujeto a } L^m \leq L^{m*} \quad (2-10)$$

donde L^m es la cantidad de suelo requerido para producir una unidad de la mercancía m ; l^m es la máxima cantidad de suelo cuando el precio es cero; δ^m es un parámetro

de elasticidad; $\bar{S}^m$ es el precio promedio del suelo para la mercancía m ; y L^{m*} es la cantidad mínima de suelo que se requiere para producir una unidad del producto m . Nótese que la Ecuación (2-6) determina el excedente/renta en el margen de cada mercancía y su valor en el punto más cercano al mercado es el excedente/renta en el margen de la mercancía que lo precede. Para aplicar la Ecuación (2-10) se debe estimar el precio promedio, para lo cual utilizamos como aproximación $(S^m + S^{m+1})/2$.

Para incluir los consumos elásticos de suelo, el procedimiento de cálculo debe ser modificado de la siguiente manera:

- a) Inicializar todos los precios de las mercancías y del suelo en cero
- b) Calcular la demanda de cada mercancía aplicando la Ecuación (2-9) y el rendimiento con la Ecuación (2-10)
- c) Calcular la pendiente del excedente/renta para cada mercancía, y consecuentemente, el orden en que se localizan alrededor del mercado. Calcular el área, la distancia al margen y el precio en el mercado de cada mercancía.
- d) Evaluar la convergencia. Si se logra, el procedimiento de cálculo termina. De lo contrario regresar a b).

En el paso b) se calculan tanto la demanda como el rendimiento del suelo en función de los precios y el valor del suelo, inicializados en cero. Al final del paso d) se calcula un nuevo conjunto de precios y valores del suelo, lo que cambiará las estimaciones de demanda y rendimiento, y así en sucesivas iteraciones. Al igual que en los ejemplos anteriores, el consumo de suelo puede ser utilizado como medida de convergencia.

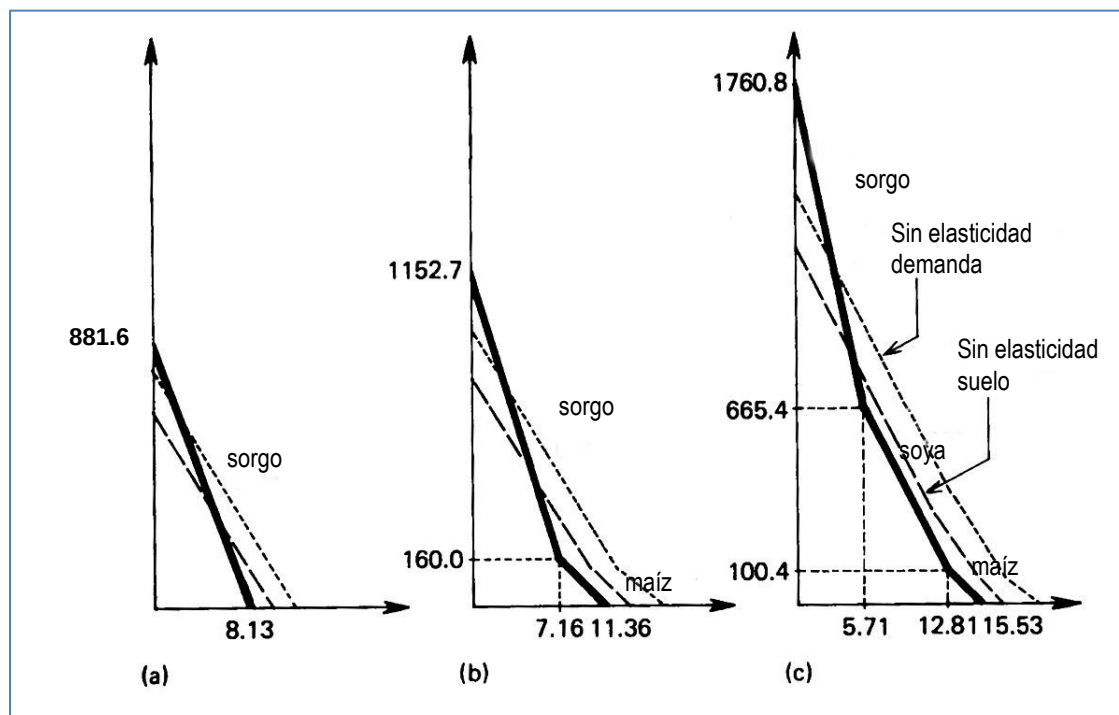
La Figura 2-7 muestra los resultados de incorporar elasticidades en el consumo de suelo, tomando como punto de partida el ejemplo de la Figura 2-5. Los valores previos de rendimiento fueron tomados como valores máximos (L^m) a lo cual se agrega las elasticidades (δ^m) y los consumos máximos (L^{m*}). Cuando se introduce la primera mercancía en la Figura 2-7(a), el rendimiento que anteriormente se había fijado en 0.70, ahora puede reducirse hasta un mínimo de 0.20. A medida que la renta de la tierra se incrementa, los productores aumentan la productividad del suelo, y al mismo tiempo los consumidores reducen la demanda. El resultado es un perfil de excedente/renta más empinado, suelo en menor cantidad y más caro, sorgo más barato y consecuentemente más consumo. Efectos similares tienen lugar cuando se introduce el maíz, pero cuando entra la soya, con menor capacidad para incrementar la productividad, el efecto es muy dramático. Dado que los productores de sorgo tienen mucho más capacidad para incrementar la productividad, se revierte el orden en que los productos se ubican alrededor del mercado. En la Figura 2-5(c) el orden era soya-sorgo-maíz, y en la Figura 2-7(c) el orden es ahora sorgo-soya-maíz. Es fácil ver que las áreas son más pequeñas, los valores del suelo son más altos y hay más demanda por productos más baratos.

En general se puede concluir que cuando se permite que el rendimiento del suelo varíe, los precios del suelo son el principal impulso para la innovación tecnológica. En la medida que entran más y más mercancías al sistema, los valores del suelo se incrementan, incrementando el precio de las mercancías en el mercado y consecuen-

temente reduciendo la demanda. Los productores se ven forzados a incrementar la productividad para recuperar la demanda, lo cual hace que todo el sistema sea más eficiente. Esto también explica por qué una sociedad menos desarrollada con un menor número de mercancías, tenderá a niveles de productividad más bajos en cada sector.

Figura 2-7: Ejemplo numérico del modelo de Von Thünen con una, dos y tres mercancías y elasticidades en el consumo de mercancías y suelo

Inputs	(a)	(b)	(c)
Número de mercancías	1	2	3
Mercancía incorporada	sorgo	maíz	Soya
Consumo máximo de suelo (l^m)	0.70	0.85	0.65
Elasticidad en el consumo de suelo (δ^m)	0.0012	0.0010	0.0001
Costo unitario de transporte	45	30	50
Demanda máxima (ρ^m)	700	400	800
Elasticidad de la demanda (τ^m)	0.0005	0.0003	0.0002
Costo unitario de producción	300	500	250



Outputs	(a)	(b)	(c)
Pendiente curva excedente/renta			
Sorgo	108.50	138.55	191.97
Maíz	-	38.18	36.96
Soya	-	-	79.48
Area cultivada			
Sorgo	207	161	102
Maíz		244	242
Soya			414
Total	207	405	758
Distancia al margen			
Sorgo	8.13	7.16	5.71
Maíz		11.36	15.53
Soya			12.81
Renta en el margen			
Sorgo	0	160.0	665.4
Maíz		0	0
Soya			100.4
Renta en el centro	881.6	1152.7	1760.8
Precio de las mercancías			
Sorgo	665.6	674.4	712.8
Maíz		840.7	966.0
Soya			953.9
Demanda por mercancías			
Sorgo	500.1	496.5	436.4
Maíz	-	310.4	298.1
Soya	-	-	657.5
Rendimiento del suelo			
Sorgo	0.41	0.32	0.23
Maíz		0.79	0.81
Soya			0.63

2.4 El modelo de usos del suelo y transporte de Wingo

La aplicación del modelo de von Thünen al caso urbano sigue una ruta natural. El modelo desarrollado por Wingo (1961) intenta explicar el fenómeno urbano, y en particular, la relación entre los costos de transporte, la localización de actividades y los valores del suelo. Wingo propone un principio de complementariedad entre el costo de transporte y la renta, según el cual cualesquiera que sea la localización de un hogar, el gasto en transporte y renta del suelo será una cantidad constante. En el caso urbano la adopción de funciones de consumo de suelo es obligatorio porque las elasticidades de las actividades residenciales son demasiado altas como para ser ignoradas.

Al igual que von Thünen, Wingo adopta una serie de supuestos simplificativos. En el área urbana idealizada hay un solo centro de empleo donde trabajan todos los residentes, los cuales tienen, además, los mismos ingresos y preferencias. Los precios de todos los productos y servicios tienen el mismo precio en cualquier lugar, excepto por el suelo. El suelo tiene una utilidad positiva, es decir, los hogares tratan de consumir

lo más posible. El costo de transporte es una función lineal de la distancia al único centro de empleo.

Supongamos que i es la localización del único centro, j la localización de un hogar cualquiera, m es la localización en el margen donde termina el área urbana, y c_{ij} es el costo de transporte desde cualquier localización j al único centro en i . La renta del suelo en cualquier punto, R_j , se define simplemente como el precio por unidad de suelo multiplicada por la cantidad consumida l_j :

$$R_j = r_j l_j \quad (2-11)$$

La hipótesis de la complementariedad entre la renta del suelo y los costos de transporte se puede representar como:

$$K = R_j + c_{ij} \quad (2-12)$$

donde K es la cantidad constante que los hogares están dispuestos a gastar en la combinación renta y transporte. En el centro mismo el costo de transporte es cero ($c_{ij} = 0$) y por lo tanto la renta es máxima ($R_i = K$). En el margen el costo de transporte es máximo ($c_{im} = K$) y la renta del suelo es mínima ($R_m = 0$). Como en von Thünen, cualquier ahorro en costos de transporte respecto al costo en el margen será transferido a la tierra en forma de renta. La renta de la tierra en cualquier punto intermedio será, entonces, el costo de transporte no incurrido:

$$R_j = c_{im} - c_{ij} \quad (2-13)$$

Como la tierra tiene una utilidad positiva, se puede establecer una función de demanda en la cual, en la medida que el precio aumenta, la cantidad consumida disminuye. Wingo propuso una función potencial, pero se puede adoptar ventajosamente una función exponencial como la Ecuación (2-10), que adaptada a este caso sería:

$$L_j = l \exp(-\delta r_j) \quad (2-14)$$

Donde L_j es la cantidad de suelo que está dispuesto a consumir el único grupo de hogares localizado en j , y δ es el parámetro de elasticidad. En cualquier punto j las ecuaciones (2-11) y (2-13) determinan la cantidad de dinero a gastar en renta y la ecuación (2-14) determina la cantidad de suelo que consumirán los hogares (tamaño de la parcela). La densidad residencial será la inversa de la cantidad consumida, es decir, $(L_j)^{-1}$. Asumiendo que la tierra es homogénea y que la región tiene una forma circular, la cantidad de suelo disponible a una distancia d_{ij} del centro, A_j , será $\pi(d_{ij})^2$, y el tamaño total del área urbana será $A^* = \pi(d_{im})^2$. En consecuencia, se puede establecer una condición de equilibrio en el cual la población P debe ser igual a la integral de la densidad sobre la totalidad del área de la ciudad:

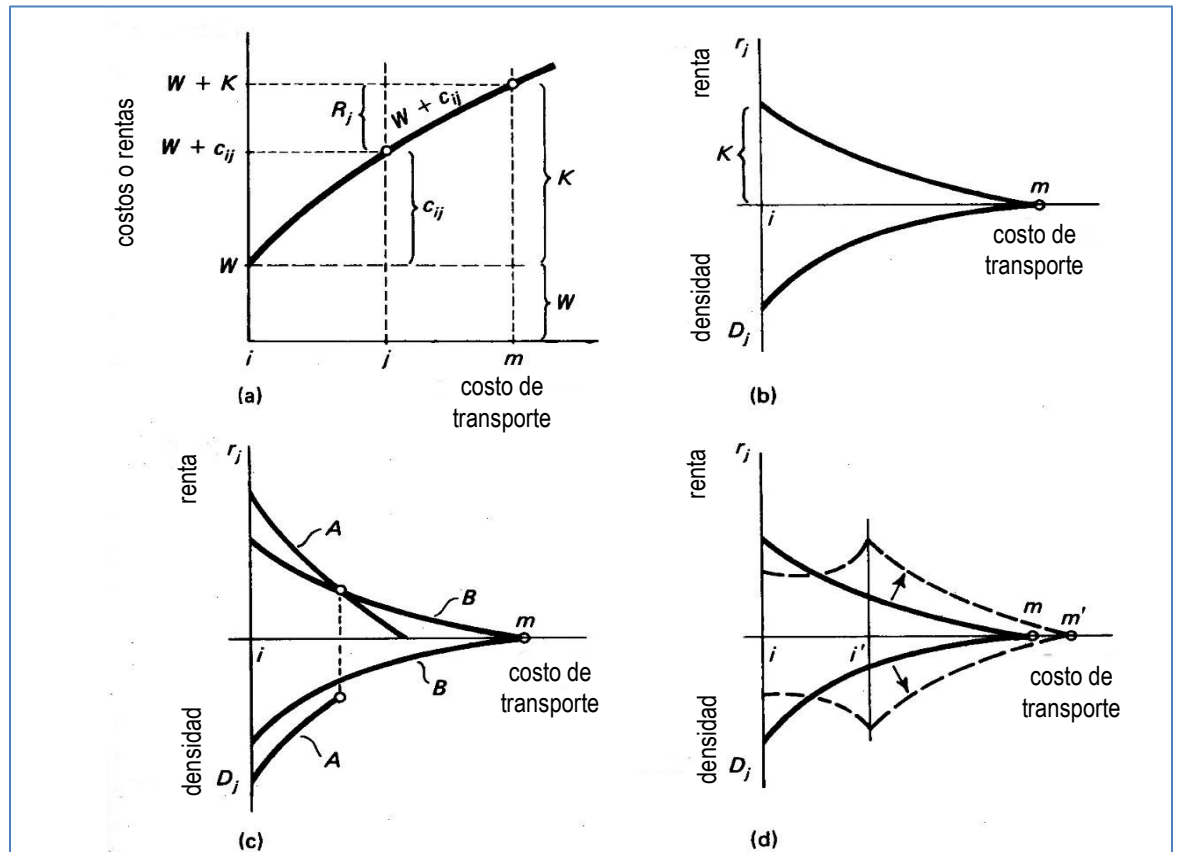
$$P = 2\pi \int_0^{d_{jm}} d_{ij} (L_j)^{-1} d_{ij} \quad (2-15)$$

En su forma más simple, el modelo de Wingo puede representarse como en la Figura 2-8. En el diagrama (a) el punto m representa el margen donde los hogares gastan todo su presupuesto K en transporte. Se supone que los hogares tienen un ingreso compuesto por un componente básico W más la cantidad K necesaria para cubrir

renta + transporte. En un punto cualquiera j los hogares gastarán una cantidad c_{ij} en transporte, y les queda un excedente $K - c_{ij}$ que será transferida al suelo en forma de renta R_j . En la Figura 2-8(b) se representan tanto la curva de la renta por unidad de suelo y la curva de densidad residencial (esta última está invertida). La renta decae desde un máximo K hasta cero en el margen. La densidad también decae desde l^{-1} en el centro hasta cero en el margen.

Luego Wingo abandona algunos de los supuestos simplificativos. Aunque una solución analítica ya no será posible, se presenta una representación gráfica. La Figura 2-8(c) considera dos tipos de hogares correspondientes a niveles de ingreso. La curva A representa un tipo de hogar muy sensible a los costos de transporte, pero no tanto al costo del suelo. La curva B representa un tipo de hogar con preferencias contrarias. El grupo A presenta una curva más empinada para la renta y la densidad. Con sólo dos grupos extremos pueden aparecer discontinuidades en las curvas, pero en la medida que se distinguen más grupos, este efecto tenderá a desaparecer. Finalmente la Figura 2-8(d) representa el caso de un segundo centro de empleo en el punto i' . El margen se desplaza desde m a m' , y tanto la curva de renta como de densidad mostrarán dos picos proporcionales a la cantidad de empleo en cada centro.

Figura 2-8: Representación gráfica de algunos aspectos del modelo de Wingo



2.5 El modelo de localización y usos del suelo de Alonso

El modelo de Alonso tiene muchas cosas en común con el de Wingo, aunque ambos fueron desarrollados independientemente y más o menos de manera contemporánea. Ambos son modelos urbanos y comparten las mismas simplificaciones, como suelo homogéneo, un único centro de empleo en el centro y demanda elástica de suelo. En el caso de Alonso puede haber hogares de varios tipos y empresas, y la ecuación presupuestaria considera tres elementos en vez de dos: renta de la tierra, transporte y un *bien compuesto* que representa todos los demás bienes y servicios consumidos. El presupuesto constante, entonces, es igual al ingreso total:

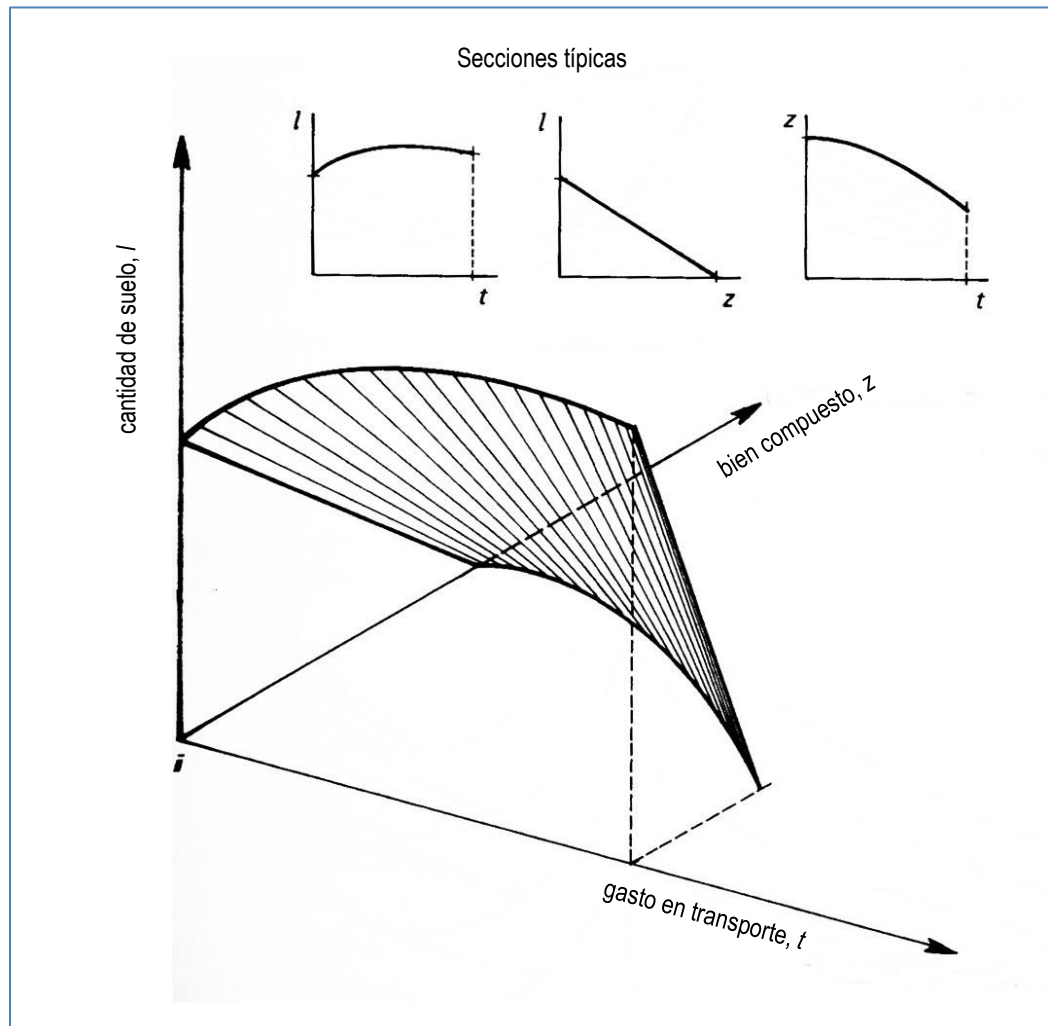
$$y = l_j r_j + c_{ij} + p_z z \quad (2-16)$$

donde y es el ingreso, p_z es el precio del bien compuesto y z es la cantidad de bienes compuestos consumida.

Los tres elementos de la ecuación (2-16) pueden ser combinados de diversas maneras. Un hogar individual puede consumir, supongamos, menos transporte para consumir más suelo y bien compuesto. Para cada hogar o firma, habrá un número infinito de combinaciones entre estos tres elementos, lo cual da lugar a una superficie tridimensional denominada *locus de oportunidades*, como se muestra en la Figura 2-9. Cada punto en la superficie tridimensional provee al hogar o firma un determinado nivel de satisfacción o utilidad. Los consumidores navegarán la superficie del locus de oportunidades para intentar maximizar la utilidad.

En la Figura 2-9 se muestran tres secciones típicas de la superficie del locus. En la segunda se traza la cantidad de suelo que puede ser consumido contra el consumo del bien compuesto z , manteniendo el consumo de transporte a un nivel constante. Esto da lugar a una función lineal, porque mientras más se consume en suelo, menos queda disponible para el bien compuesto z .

El primer diagrama muestra la relación entre la cantidad de suelo consumida y el gasto en transporte, manteniendo z constante. A medida que un individuo se aleja del centro, puede consumir más suelo cada vez a menor precio. Sin embargo, se llega a un punto en que los costos de transporte compensan los ahorros en suelo, y de allí en adelante se ven forzados a reducir el consumo. Una situación similar se presenta en el tercer diagrama que presenta la relación entre el gasto en transporte y el bien compuesto, suponiendo que se gasta una cantidad constante en suelo.

Figura 2-9: Superficie del *locus de oportunidades* en el modelo de Alonso

Cada combinación de suelo, transporte y bien compuesto genera un determinado nivel de utilidad, con lo cual se puede dibujar un mapa de indiferencias, como se muestra en la Figura 2-10. En el primer diagrama se traza el suelo contra el transporte, suponiendo un consumo constante de z . Cada punto a lo largo de cada curva de indiferencia representa una combinación de consumo de transporte y suelo que genera el mismo nivel de utilidad para los individuos, con lo cual serán indiferentes a cuál combinación elegir. La forma algo extraña de la curva se debe al carácter diferente de los consumos de suelo y transporte: el consumo de suelo tiene una utilidad positiva, mientras el transporte tiene utilidad negativa. En otras palabras, los individuos tratarán de consumir la mayor cantidad de suelo posible y la menor cantidad de transporte. La curva muestra que, a medida que el consumo de transporte se incrementa, el consumo de suelo debe aumentar también para mantener el mismo nivel de utilidad. Los individuos de una misma categoría tendrán un número infinito de

curvas de indiferencia paralelas. Las curvas más altas en el diagrama representan niveles de utilidad mayores.

El segundo diagrama de la Figura 2-10 muestra curvas de indiferencia entre el suelo y el bien compuesto. Ambos bienes tienen utilidad positiva, de tal manera que una pequeña cantidad de suelo con una gran cantidad de bien compuesto producirá la misma utilidad que una gran cantidad de suelo con una pequeña de z . Finalmente, el tercer diagrama muestra la forma en que se debe combinar el transporte con el bien compuesto para generar el mismo nivel de utilidad. Aquí, nuevamente, se está combinando una utilidad positiva con una negativa, lo cual genera curvas de forma similar a los del primer diagrama.

Cuando se combinan las tres curvas de indiferencia, se generan unas superficies de indiferencia en forma de bol, lo cual también se presenta en la Figura 2-10. Cualquier punto en una de estas superficies de indiferencia producirá el mismo nivel de utilidad. Boles más cerca del origen representan niveles de utilidad más bajos, y serán más altos a medida que suben y se alejan del centro.

Analíticamente, la utilidad puede ser representada como una función del consumo de suelo, transporte y bien compuesto:

$$u = f(l, t, z) \quad (2-17)$$

Esta función será máxima cuando:

$$du = 0 = u_l dl + u_t dt + u_z dz \quad (2-18)$$

donde u_l, u_t, u_z representan la utilidad con respecto a suelo, transporte y el bien compuesto. De acuerdo a la teoría microeconómica, en equilibrio la tasa de sustitución marginal entre dos bienes cualesquiera será igual a la tasa de sus costos marginales. En este caso:

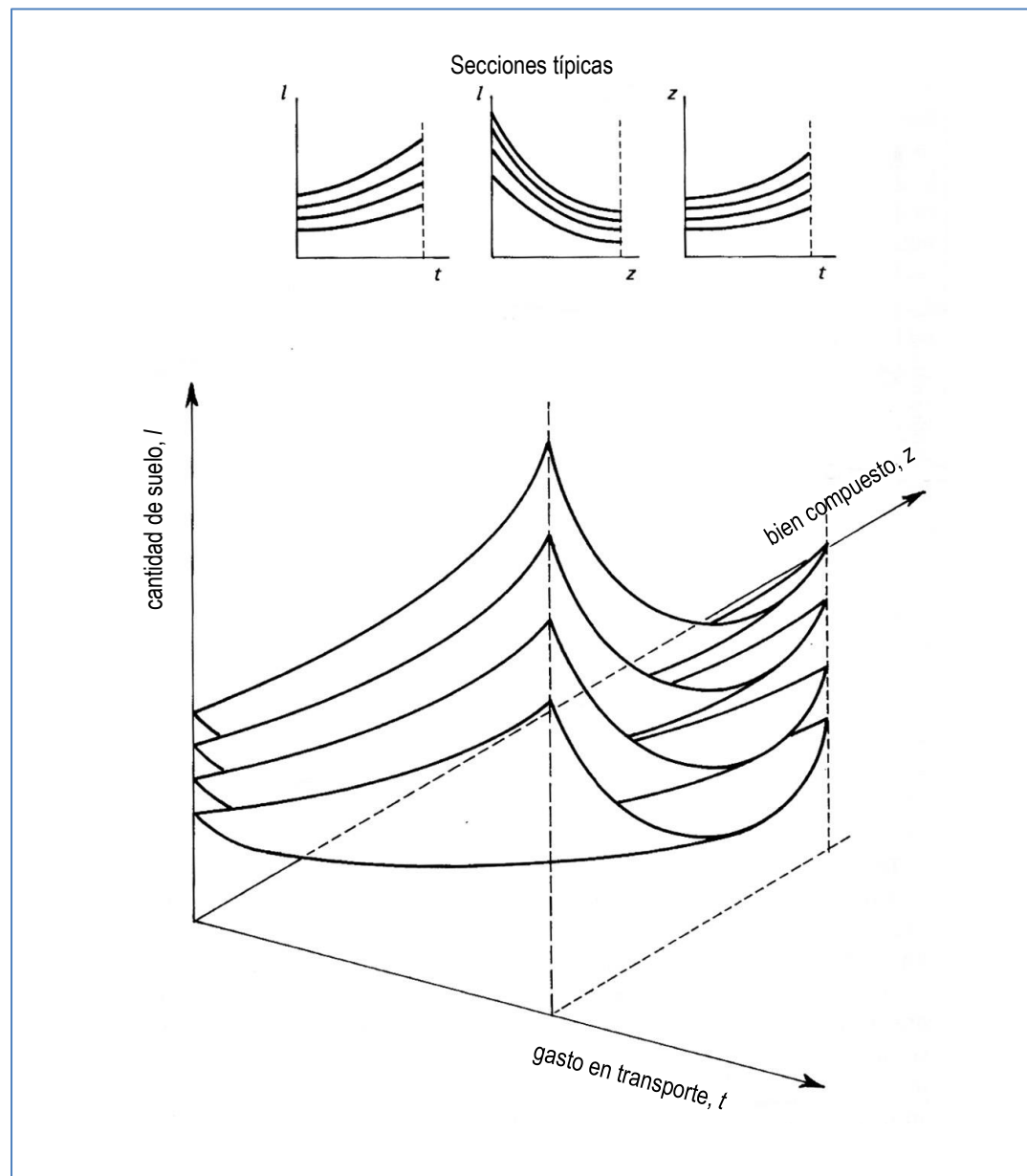
$$\frac{u_l}{u_z} = \frac{r}{p_z} \quad (2-19)$$

y

$$\frac{u_t}{u_z} = \frac{l \left(\frac{d_r}{d_t} + \frac{d_c}{d_t} \right)}{p_z} \quad (2-20)$$

Tanto u_l/u_z como u_t/u_z representan tasas marginales de sustitución, y los elementos a la derecha de las ecuaciones (2-19) y (2-20) representan la relación de los costos. En (2-19) la tasa entre las utilidades respecto al suelo y el bien compuesto es igual a la tasa entre sus precios, es decir, el precio del suelo r y el precio del bien compuesto p_z . En (2-20) se establece una relación similar entre el transporte y el bien compuesto, donde l es la cantidad de suelo consumido. En este caso $l \left(\frac{d_r}{d_t} + \frac{d_c}{d_t} \right)$ representa el costo marginal de alejarse del centro. A medida que el individuo se aleja, el precio del suelo decrece a una tasa d_r/d_t y el costo de transporte c se incrementa a una tasa d_c/d_t . Si la Ecuación (2-19) se resuelve simultáneamente con la (2-18) y la restricción presupuestaria (2-16), se obtienen las combinaciones óptimas de suelo, transporte y el bien compuesto.

Figura 2-10: Mapa de indiferencias en el modelo de Alonso

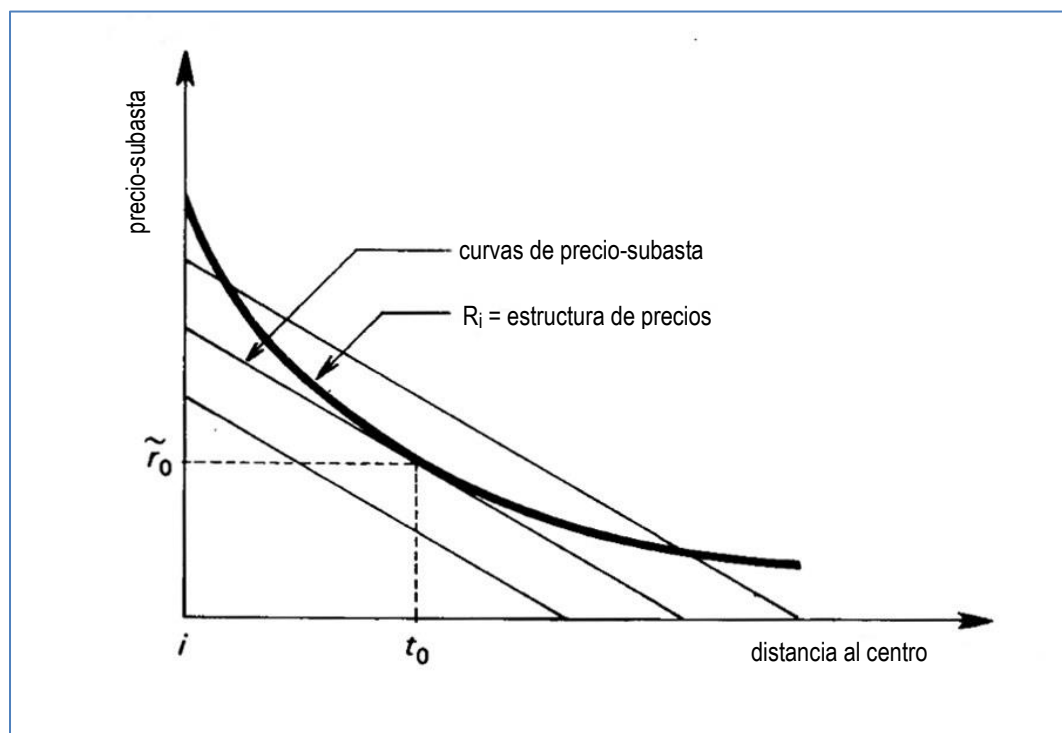


En este punto Alonso introduce el concepto de *precio-subasta* (*bid price*), que es el precio que un individuo está dispuesto a pagar a medida que se aleja del centro para obtener el mismo nivel de satisfacción. Esto equivale a un precio de demanda a utilidad constante. En el centro mismo, el precio-subasta es máximo, y luego decae hacia el margen. Esto se muestra en la Figura 2-11: cerca del centro a una distancia t_1 , un individuo está dispuesto a pagar un precio-subasta $\tilde{r}_1$ y más allá, a una distancia t_2 ofrece un precio-subasta $\tilde{r}_2$. En ambos casos el individuo percibe la misma utilidad, al igual que cualquier punto a lo largo de la curva. Cada individuo tendrá un número

infinito de curvas de precio-subasta paralelas, como se muestra en la misma Figura 2-11. En este caso curvas más bajas implican mayor satisfacción, porque se obtiene lo mismo con menos dinero. Nótese que un precio $\tilde{r}$ no es necesariamente igual al precio final de mercado r , ya que las subastas no son necesariamente exitosas.

En equilibrio, la estructura de precios (renta del suelo en cada punto) y la curva de precio-subasta deben ser tangentes, ya que si se cruzan, quiere decir que la curva de estructura de precios es tangente a una curva más baja de precios-subasta que por definición sería preferible. En la Figura 2-11 el precio de equilibrio es $(t_0, \tilde{r}_0)$, que es el punto en que ambas curvas tienen la misma pendiente, esto es, cuando $d_r/d_t = d_{\tilde{r}}/d_t$.

Figura 2-11: Curvas de precio-subasta para un individuo en el modelo de Alonso



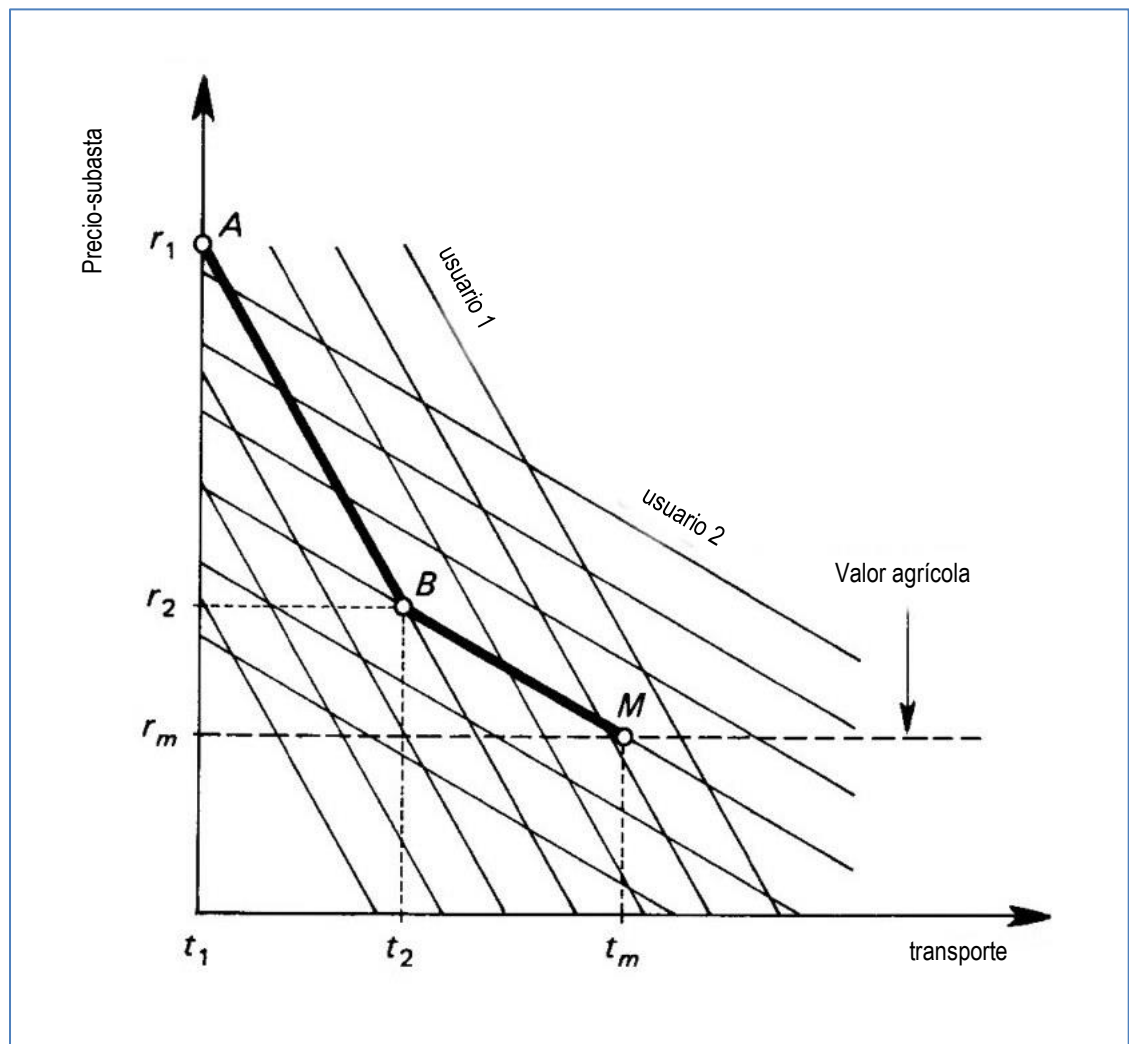
Las curvas de precio-subasta tendrán pendientes diferentes para cada individuo dependiendo de su comportamiento respecto a los costos de transporte y la facilidad con que los pueden sustituir por los otros bienes l y z . La Figura 2-12 presenta un caso con dos usuarios 1 y 2. El usuario 1 presenta curvas muy empinadas, lo cual revela que está ansioso por vivir cerca del centro, ya sea porque es pobre y no puede gastar mucho en transporte y prefiere consumir una cantidad muy pequeña de suelo de alto precio, o es una empresa comercial que depende de una localización central para atraer a sus clientes. En ambos casos su utilidad decae rápidamente a medida que se alejan del centro. Por contraste, las curvas del usuario 2 son menos empinadas, porque podría tratarse de un hogar de alto ingreso que puede pagar altos costos de

transporte y le gustan las parcelas grandes y los placeres que trae la vida en los suburbios. El resultado es que el punto A será el precio de equilibrio del usuario 1 con un valor (r_1, t_1) y r_2 será su precio en el margen. Al mismo tiempo r_2 será el precio de equilibrio del usuario 2, y si no hay más usuarios, r_m será el precio en el margen del usuario 2 y el margen de la ciudad a una distancia t_m .

En este punto se pueden derivar dos conclusiones:

- Usuarios con curvas de precios-subasta más empinadas se localizarán cerca del centro
- El precio en el margen de un usuario es el precio de equilibrio del que le sigue

Figura 2-12: Cadenas de precio-subasta para dos usuarios en el modelo de Alonso



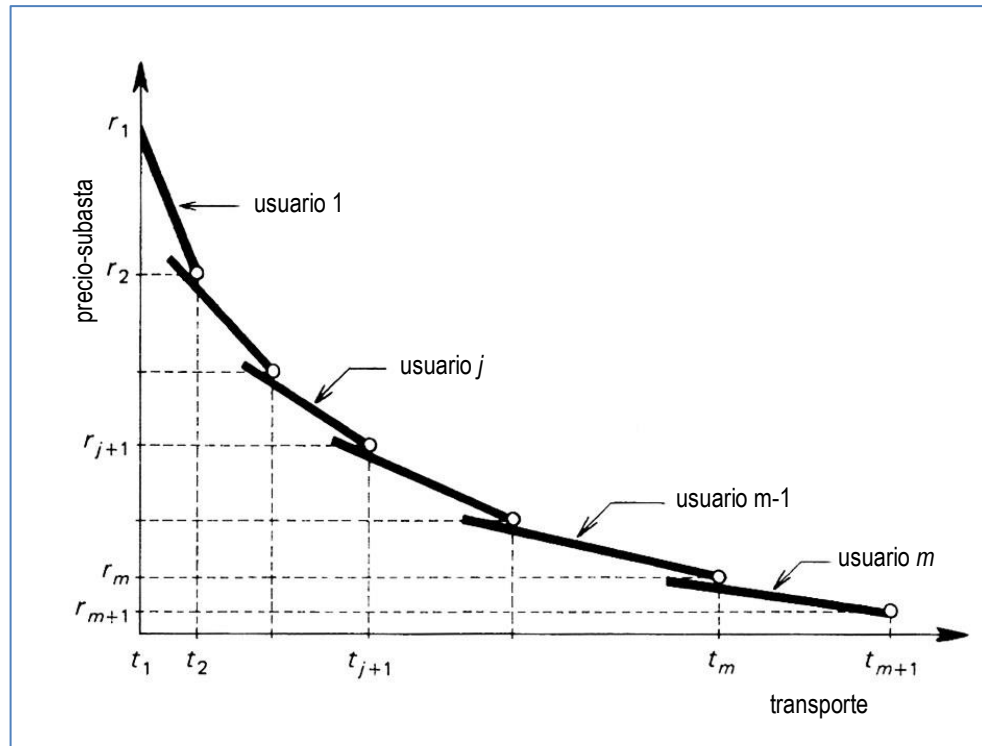
Hasta ahora, se ha supuesto que se conoce la estructura de los precios del suelo, pero justamente el propósito del modelo es determinar los precios del suelo resultantes en cada localización, dado que en la ciudad hay una determinada población de hogares y firmas, cada uno con sus curvas características de precios-subasta. Así como sugerimos para el modelo extendido de Von Thünen, el problema no es lineal, tal que Alonso propone una solución algorítmica. Alonso sí provee una solución analítica, pero sólo después que se ha obtenido una aproximación por el método iterativo que se describe a continuación.

La solución algorítmica de Alonso comienza por la localización más céntrica, donde se adopta una estimación inicial del precio del suelo r_1 . El usuario con la curva de precio-subasta más alta se localizará en esta ubicación central, lo cual se indica en la Figura 2-13 como el usuario 1 con localización t_1 . El próximo usuario, es decir, el usuario con la segunda curva de más pendiente, tomará la localización siguiente t_2 , que es la que viene inmediatamente después que los requerimientos de suelo del usuario anterior están satisfechos. La ecuación presupuestaria (2-16) puede utilizarse para determinar el radio de un círculo con área l_1 , dado el precio inicial estimado para el centro.

Esto genera un punto en el diagrama con renta del suelo r_2 y distancia al centro t_2 . El valor r_1 es el precio de equilibrio del usuario 1 y el valor de r_2 es simultáneamente el precio de equilibrio del usuario 2 y el precio en el margen del usuario 1. Así se empieza a conformar una cadena de curvas de precio-subasta.

El algoritmo continúa procesando cada usuario a la vez en orden de la pendiente de su curva de precio-subasta. Cuando se ha procesado el último usuario, digamos el usuario n , se puede estimar su precio en el margen r_{n+1} . El precio del suelo más allá de este margen puede estimarse independientemente: si en el sistema se han incluido productores agrícolas, entonces el precio del suelo en el margen $r_{m+1} = 0$, de lo contrario r_{m+1} = precio del suelo agrícola. Si el precio más allá del margen conocido coincide con el estimado por el modelo, significa que la estimación inicial del precio en el centro r_1 era correcto. Seguramente habrá una diferencia, positiva o negativa, de tal manera que el estimado inicial debe ajustarse, repitiendo nuevamente la cadena y verificando al final el precio en el margen contra el valor conocido. Este proceso iterativo deberá continuar hasta que la diferencia entre el precio en el margen conocido versus estimado esté por debajo de un valor aceptable.

Figura 2-13: Cadenas de curvas de precio-subasta para muchos usuarios en el modelo de Alonso



2.6 Múltiples áreas de mercado: los modelos de Christaller y Lösch

Los trabajos de Christaller y Lösch se basaron en el original de von Thünen, pero intentan una explicación acerca de la formación de regiones más complejas, con múltiples centros, y la forma como estas regiones interactúan entre ellas. La explicación se conoce generalmente como *teoría del lugar central*.

La explicación comienza por una serie de supuestos simplificativos, como la existencia de una planicie ilimitada y sin peculiaridades, donde se distribuye homogéneamente una población de agricultores autosuficientes. Cada agricultor produce las mercancías para su propio consumo, entre otras y por ejemplo, cerveza. Gracias a mejoras tecnológicas, algunos agricultores pueden organizar la producción de cerveza a mayor escala, generando un excedente. Debido a que la región es perfectamente homogénea, el primer agricultor que logra esto puede estar en cualquier ubicación aleatoria.

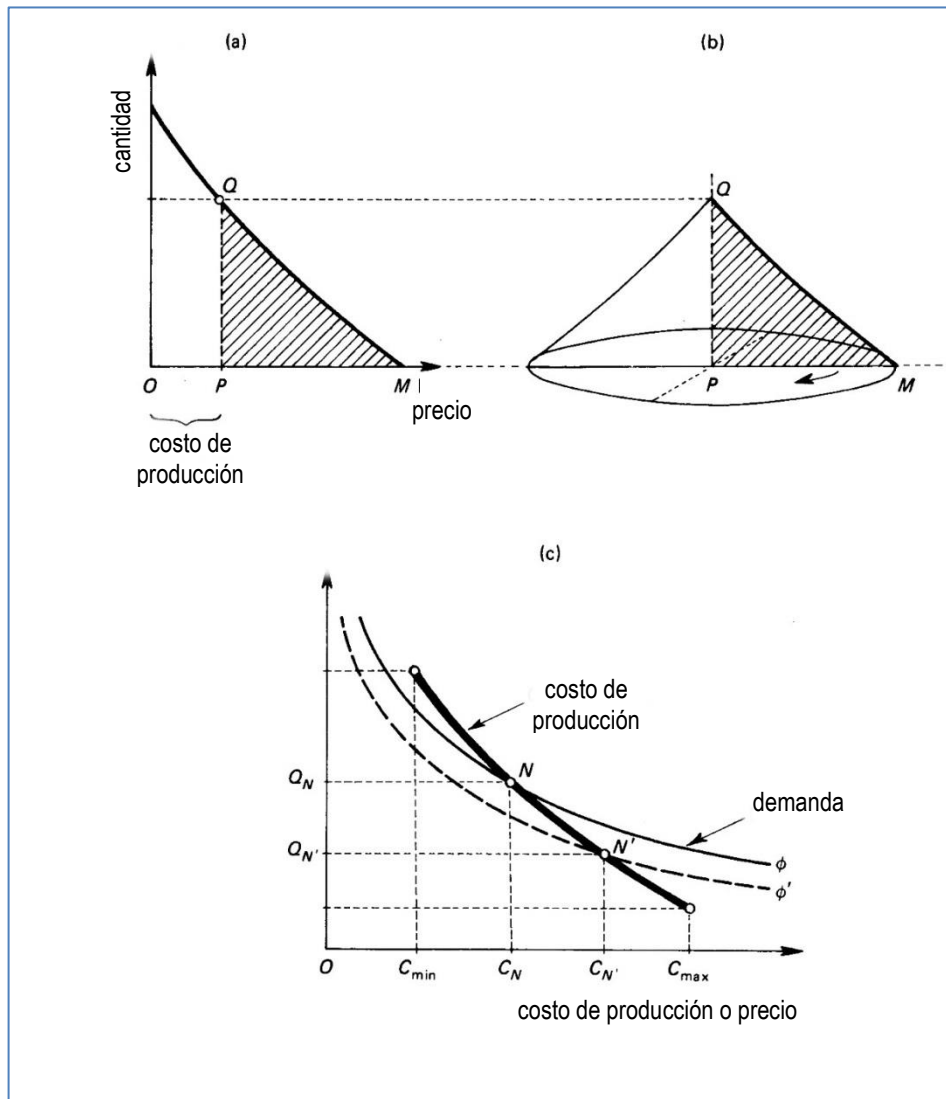
Cualquiera que sea este primer punto en el espacio, la primera pregunta que se hará el productor potencial es la cantidad de cerveza que podrá vender a otros. Las economías de escala estimularán la demanda de cerveza, pero el costo de transportar la cerveza desde la fábrica a otros consumidores tendrá un efecto opuesto. Además, dependiendo del precio, los consumidores demandarán una cantidad variable del

producto, tal que se genera una función de demanda como la que se presenta en la Figura 2-14(a).

En la fábrica, el precio de la cerveza será su costo de producción OP , donde los consumidores estarán dispuestos a consumir la mayor cantidad de cerveza. A medida que la distancia desde la fábrica se incrementa, el precio también se incrementa debido a los costos de transporte, forzando la demanda hacia la baja, hasta llegar a un punto M donde los costos de transporte son tales que no se venderá más cerveza. PM será el radio del *área de mercado* de una unidad de producción localizada en P . Rotando el triángulo PQM en torno al eje PQ , se genera un volumen cónico como el de la Figura 2-14(b), que si se multiplica por la densidad de población, se obtiene la cantidad total de cerveza que se venderá.

En esta explicación, se supuso que OP es el costo de producción, pero éste, a su vez, dependerá del tamaño de la demanda. La Figura 2-14(c) presenta dos curvas: una curva del costo de producción y la función de demanda total φ . La función de costo de producción varía desde un máximo C_{max} a un mínimo C_{min} , dependiendo de la cantidad de cerveza vendida. La curva de demanda se reducirá a medida que el precio de la cerveza sube. Nuestro agricultor no podrá vender cerveza si la curva del costo de producción está por debajo de la curva de demanda. En el punto N , sin embargo, ambas curvas se intersectan, tal que podrá vender una cantidad QN al precio CN . QN será la cantidad total de cerveza vendida, determinada por los diagramas Figura 2-14(a) y (b).

Figura 2-14: Formación de un área de mercado en la teoría del lugar central



Supongamos ahora que en otra localización aleatoria emerge un segundo productor. Si este segundo productor está a una distancia mayor que el doble de PM , surgirá otra área de mercado del mismo tamaño, como en la Figura 2-15(a). Como se muestra en la Figura 2-15(b), pueden aparecer terceros y cuartos productores, esta vez con áreas de mercado solapándose unas con otras. Cuando dos áreas de mercado se solapan, la demanda se reducirá para ambos productores. Esto se mostró en la Figura 2-14(c) arriba, en que la curva de demanda se desplazará desde ϕ a ϕ' , moviendo el punto de equilibrio de N a N' . Mientras más grande es el solape, más grande será el desplazamiento de la curva de demanda.

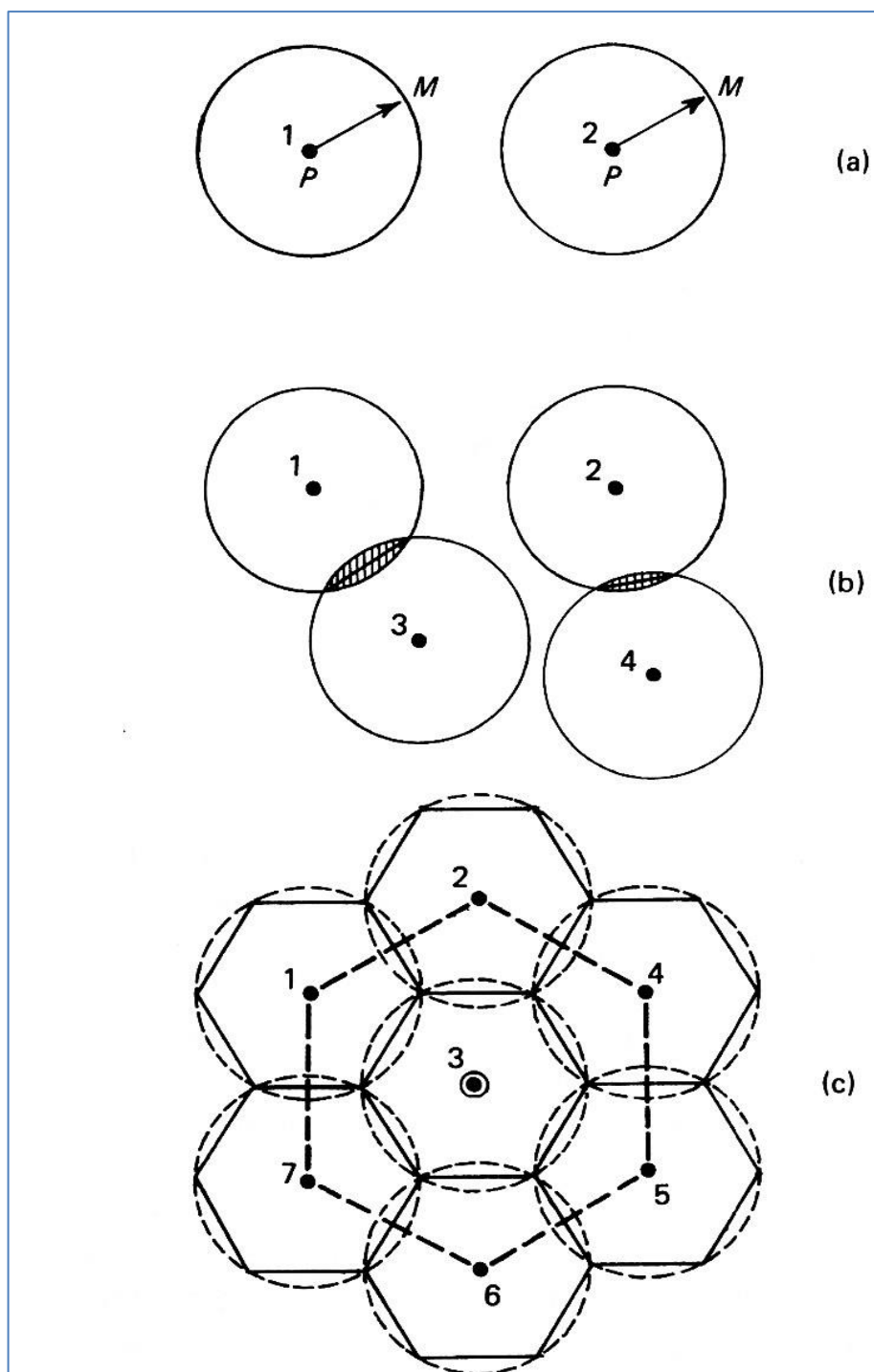
A medida que más y más productores emergen en el paisaje, el número y tamaño de los solapes tenderá a aumentar, hasta que algunas curvas de demanda se desplazarán

hasta tal punto que ya no intersectarán la curva del costo de producción, con lo cual el productor deberá cerrar. El proceso continuará hasta que todos los productores logren un estado de equilibrio en que están lo más cerca posible entre ellos, y no pueden entrar ni salir productores del sistema. En el equilibrio, todas las curvas de costo de producción serán tangentes a las curvas de demanda, y como lo demostró Christaller, las áreas de mercado tendrán formas hexagonales regulares, como se muestra en la Figura 2-15(c). En este sistema, una fina malla de carreteras se requerirá para transportar la cerveza desde los productores a los consumidores.

Supongamos ahora que, dado que hay un gran número de productores de cerveza, alguien decide montar una fábrica de barriles. La ubicación más lógica será contigua a una fábrica de cerveza existente, y ya que están homogéneamente distribuidos en el espacio, esto puede ocurrir aleatoriamente, por ejemplo 3 en la Figura 2-15(c). El mismo análisis que se aplicó a los productores de cerveza puede aplicarse a los productores de barriles, pero con parámetros diferentes. Esto dará lugar a un área de mercado más grande, como se muestra en la figura, que además debe coincidir con un número discreto de productores de cerveza. En otras palabras, la producción de barriles debe ajustar su punto de equilibrio para maximizar el número de coincidencias con los productores de cerveza. Esto lleva a una jerarquía de áreas de mercado más alta, en la cual algunos nodos albergarán tanto a una fábrica de cerveza como una de barriles. También es importante destacar que ahora algunas de las carreteras de la malla pequeña transportan tanto cerveza como barriles, y como consecuencia, crecerán en importancia.

La región crecerá en importancia a medida que se introducen más y más mercancías. El resultado será un gran patrón de hexágonos regulares de diferentes niveles jerárquicos unos arriba de otros. Algunos nodos sólo tendrán uno o dos productores, pero otros podrán acumular un número mucho mayor, transformándose en importantes áreas metropolitanas. De manera similar algunas carreteras pequeñas sólo transportarán unos pocos productos, mientras otras llevarán muchas mercancías a distancias muy largas, transformándose en autopistas de importancia nacional.

Figura 2-15: Formación de un sistema de áreas de mercado en la teoría del lugar central



2.7 Algunas conclusiones sobre los modelos microeconómicos espaciales

Los modelos descritos en las secciones anteriores tienen muchas características comunes. En primer lugar, explican los usos del suelo como el resultado de un mecanismo de mercado, en el cual hogares y empresas compiten por el espacio, generando un patrón de rentas del suelo en equilibrio. A la vez, los precios de equilibrio favorecen la distribución óptima del suelo a los hogares y las empresas, y estos, a su vez, maximizan su utilidad.

El modelo de von Thünen, a pesar que fue desarrollado muchos años atrás, permanece como la propuesta más general porque equilibra no sólo el mercado de suelo, sino también el de las mercancías. En este capítulo hemos extendido el modelo básico de von Thünen para incluir elasticidades en el consumo del suelo y las mercancías. El resultado es un modelo aún más general que provee todas las variables y mecanismos necesarios para una explicación simple acerca de cómo funciona un sistema económico y espacial.

Los modelos de Wingo y Alonso actualizan la propuesta de von Thünen al incorporar muchos elementos del moderno análisis microeconómico. Conceptualmente, sin embargo, el único elemento que añaden a la versión extendida es la restricción presupuestaria, con dos elementos en Wingo y tres en Alonso. La restricción presupuestaria, sin embargo, está implícita en el modelo extendido de von Thünen a través de las elasticidades cruzadas, y podría adaptarse fácilmente a cualquier área urbana. El lector puede comprobar esto fácilmente al reemplazar mentalmente las tres mercancías agrícolas por, por ejemplo, firmas comerciales y dos estratos de hogares. Un corolario interesante de esto es que en esta aplicación se podría establecer una relación específica entre renta del suelo y salarios. De hecho, si los trabajadores tienen que pagar más por el suelo, se transforman en una 'mercancía' más costosa.

Las contribuciones de Christaller y Lösch son una contribución importante porque proveen una explicación acerca de la forma en que se generan regiones multicéntricas. Cada mercancía genera su propio patrón de localización, y una red de áreas de mercado. A su vez, cada patrón está condicionado por los demás, generando jerarquías y redes de transporte de gran potencial como desarrollo teórico. Idealmente se podría desarrollar un programa de computación para demostrar la formación de regiones complejas multinivel, utilizando elementos aleatorios para crear un paisaje diferente en cada corrida del modelo. Debe aclararse que estos componentes aleatorios no forman parte de la explicación original de Christaller y Lösch, y por lo tanto también deben ser consideradas como una extensión propuesta aquí.

Por importantes que sean estos desarrollos teóricos, los logros de los modelos espaciales microeconómicos no han estado acompañados por aplicaciones prácticas. Como lo señala Wilson (1974), con la única excepción del modelo de Herbert y Stevens (1960) *'no se han desarrollado modelos muy excitantes derivados de este trabajo. Se han obtenido muchos conceptos profundos y análisis cualitativos, pero muy pocos modelos efectivos. Una posible explicación para esto es que la mayoría de los economistas, luego de establecer sus marcos teóricos, recurren luego a modelos economé-*

tricos lineales o log-lineales para su trabajo empírico. Alonso (1964), como se ha descrito, presenta un modelo lineal muy simple como evidencia empírica de una teoría por lo demás altamente elaborada.

Aún si la restricción impuesta por la econometría tradicional es importante, se puede mencionar muchas otras restricciones, en particular la forma en que el espacio y las actividades están representados. Debido a que estos modelos microeconómicos representan el espacio como una variable continua, es virtualmente imposible representar la riqueza de la geografía urbana y regional. Además de Wingo y Alonso, otros autores han dedicado un esfuerzo considerable en la representación de otras formas en sus formulaciones continuas, sólo para terminar con soluciones para situaciones que no se dan en la realidad, como óvalos, estrellas o cuadrados. Otra dificultad importante de este enfoque es que es imposible representar más de un centro de mercado o empleo. Considérese la Ecuación (2-13) del modelo de Wingo como ejemplo, en que la renta en cualquier punto j se calcula como los ahorros en el costo de transporte respecto del margen, es decir, $R_j = c_{im} - c_{ij}$. Si se introducen dos centros de empleo, las superficies de renta y densidad se parecerán a una carpa de circo de dos postes, con dos márgenes, dos distancias al mercado y cuatro distancias al margen, con lo cual el modelo se desploma estrepitosamente.

Más aún, es difícil representar en términos prácticos el comportamiento individual de hogares, empresas y terratenientes, ya que en cualquier ciudad o región puede haber miles o millones de ellos. En cualquier estudio de caso real, la agregación es inevitable. Sin embargo, como el propio Alonso (1964) lo señala, en el enfoque microeconómico es imposible agregar las curvas de demanda como se hace en la teoría clásica del equilibrio. Debido a que las curvas de demanda de suelo para cada individuo varían con la localización, es imposible saber cuál curva debe sumarse en el proceso de agregación.

Resulta claro de los argumentos anteriores que los modelos microeconómicos requieren modificaciones fundamentales si tienen alguna pretensión de ser aplicados en la práctica. Esto no sólo es importante para la práctica profesional, sino también para el desarrollo teórico. En el Capítulo 1 definimos a los modelos como proposiciones comprobables derivados de las teorías. Es sólo cuando las teorías se transforman en modelos verificables y refutables que pueden ser evaluadas y mejoradas e incluso descartadas.

En los próximos capítulos se presentarán y discutirán otros marcos teóricos, en especial interacción espacial. Se verá que, resolviendo el problema de la agregación, es posible superar muchas de las dificultades mencionadas, abriendo, así, un área de investigación y desarrollo muy amplia.

3 Modelos de interacción espacial

Puede decirse que los modelos microeconómicos espaciales descritos en el capítulo anterior pertenecen a un enfoque desagregado, porque el análisis se centra alrededor de unidades individuales. Por contraste, el enfoque adoptado por los modelos de interacción espacial puede definirse como agregado, ya que tanto el espacio como las actividades están agrupados en categorías discretas. En lugar de analizar puntos específicos en el espacio, se definen zonas que contienen un gran número de actividades. Las actividades, por su parte, están agregadas en grupos, suponiendo que todos los miembros de un grupo tienen un comportamiento similar.

3.1 Orígenes y desarrollo de los modelos de interacción espacial

En la literatura hay una gran abundancia de referencias a los modelos de interacción espacial, de tal manera que aquí sólo se intenta un breve resumen. Lee (1973), Batty (1975, 1976) y Baxter (1976) contienen excelentes síntesis. A pesar de los trabajos pioneros de Reilly (1931), Hoyt (1939), Stewart (1948), Zipf (1949), Converse (1949), Clark (1951), Isard (1956) y otros, la mayoría de los autores otorgan el inicio del análisis moderno de interacción espacial en 1959 con Hansen. De allí arrancó un gran flujo de actividad de investigación.

Hay muchos factores que incidieron en el rápido desarrollo de esta área de investigación, pero quizás el más importante es que los modelos de interacción espacial son relativamente fáciles de aplicar a casos reales, produciendo resultados útiles y realistas. Otro factor importante es que los modelos de interacción espacial son de particular relevancia para el análisis de transporte. Durante los años 60 y comienzos de los 70, como resultado del rápido crecimiento de las ciudades y la disponibilidad del automóvil, se implementó un gran número de proyectos de autopistas y sistemas de transporte masivo, lo cual significó que los modelos de interacción espacial estaban siendo demandados.

Los primeros modelos de interacción espacial fueron derivados de una analogía gravitacional, lo cual se deriva de forma natural del enfoque agregado. En lugar de analizar las 'moléculas' individuales de un área urbana, el enfoque de interacción espacial estaba más interesado en el comportamiento de 'masas' y las relaciones entre ellas. La analogía gravitacional original derivó, gracias a pruebas empíricas, en una verdadera teoría urbana y regional.

Uno de los primeros pasos en esta dirección fue el trabajo mencionado de Hansen (1959), quien, utilizando la analogía gravitacional, elaboró en la relación entre residentes y la accesibilidad al empleo. Luego Huff (1962, 1963) contribuyó de manera importante al interpretar el modelo gravitatorio en términos económicos y de probabilidades. Lowry (1964) se transformó en un hito en la historia de los modelos de interacción espacial, al utilizar principios de base económica y la introducción de un

multiplicador para proveer una explicación comprehensiva de la estructura urbana. La propuesta de Lowry fue luego mejorada con los trabajos de Rogers (1968) y Garin (1966) utilizando métodos matriciales. La interacción espacial se alejó aún más de sus orígenes gravitacionales con el importante trabajo de Wilson (1967, 1970, 1974) sobre maximización de la entropía. Este principio creó las bases para el desarrollo e implementación de numerosos modelos operacionales como los de Echenique (1968) y Batty (1976).

La posibilidad de aplicar modelos de interacción espacial a casos reales ha sido mejorada con el desarrollo de técnicas de calibración para estimar los diversos parámetros involucrados, especialmente con los trabajos de Angel y Hyman (1971) y Baxter y Williams (1975). La posibilidad de desagregar el modelo de Lowry ha sido una preocupación constante en los investigadores, resaltando los trabajos de Baxter y Williams (1973) y Wilson (1974).

3.2 Conceptos básicos

En los modelos de interacción espacial el suelo utilizado por las actividades se concibe como unidades agregadas o *zonas*, que contienen determinadas cantidades de actividades dentro de ellas. Estos agregados espaciales interactúan generando flujos de naturaleza diversa, desde flujos muy concretos como viajes, migraciones, movimiento de mercancías, hasta otros de naturaleza más abstracta como dependencias, difusiones, oportunidades, etc. Las zonas se relacionan entre ellas a través de infraestructuras o redes, dependiendo de la naturaleza de los flujos.

La versión gravitatoria de un modelo de interacción espacial afirma que la interacción entre dos zonas es proporcional al número de actividades en cada zona (masa), e inversamente proporcional a la fricción que impone la infraestructura que las conecta. La formulación más simple es, entonces:

$$F_{ij} = gM_iM_jf(c_{ij}) \quad (3-1)$$

en donde F_{ij} es la magnitud del flujo entre las zonas i y j , M_i y M_j es el número de actividades en las zonas i y j , y $f(c_{ij})$ es alguna función (negativa) de la fricción de la infraestructura que conecta i con j , medida en términos de distancia, tiempo, costo o cualquier otra similar. El término g es una constante que transforma las unidades en que se miden las actividades en las unidades en que se miden los flujos.

Si el sistema está compuesto por más de dos zonas, el flujo entre dos zonas cualesquiera estará restringido por el efecto combinado de todas las otras zonas presentes en el sistema:

$$F_{ij} = g \frac{M_iM_jf(c_{ij})}{\sum_j M_jf(c_{ij})} \quad (3-2)$$

El denominador representa el efecto combinado de todas las zonas en el sistema, incluidas i y j . El modelo puede utilizarse de diversas maneras. Si el interés se centra sobre los flujos mismos, como en un modelo de demanda de transporte, F_{ij} puede representar viajes, M podría representar variables de producción y atracción de viajes

y g sería un factor de generación de viajes. Sin embargo, si la intención del modelo es la localización de actividades en el espacio, F_{ij} sería un flujo abstracto que representa las actividades que son generadas en i y se localizan en j . Una vez generados los flujos para todos los pares de zonas, pueden sumarse respecto a los orígenes para estimar el número de actividades que se localizó en cada zona, X_j :

$$X_j = \sum_i F_{ij} \quad (3-3)$$

Alternativamente el modelo puede ser utilizado para medir el ‘potencial’ de una zona respecto a las demás, o para determinar la localización óptima de una industria con respecto a un mercado en particular. El potencial de una zona, V_i , puede calcularse como:

$$V_i = g \sum_j M_j f(c_{ij}) \quad (3-4)$$

Un modelo potencial puede ser también un modelo de localización de actividades:

$$X_j = X_* \frac{V_j}{\sum_j V_j} \quad (3-5)$$

donde X_j es el número de actividades localizadas en j y X_* es el número total de actividades a localizar.

3.3 La derivación por maximización de la entropía

Las formulaciones presentadas arriba están basadas en supuestos relativamente simples y heurísticos. Wilson (1970) introdujo el método de la maximización de la entropía, que le dio a los modelos de interacción espacial un marco teórico nuevo, más general y robusto. El concepto de maximización de la entropía fue desarrollado originalmente en mecánica estadística y luego se transformó en una teoría general de información aplicable a cualquier sistema. La entropía puede interpretarse de muchas maneras: puede relacionarse con probabilidad e incertidumbre, a una distribución probabilística o a estadísticas Bayesianas. Cabe destacar que la introducción de la entropía a las ciencias urbanas y regionales no significa que se está adoptando, otra vez, una analogía con la física, ya que la maximización de la entropía es un método muy general. Como señala March (1972) *‘decir que el aplicar el enfoque de maximización de la entropía a las ciencias urbanas equivale a tratar a la gente como si fueran moléculas de gas tiene tan poco sentido que decir que si el método es aplicado al estudio de los gases equivale a tratar las moléculas de gas como si fueran gente.’*

Considérese un ejemplo sencillo para ilustrar los componentes principales de este método. Imagínese una botella completamente vacía que repentinamente recibe un gas de una botella más pequeña. Al entrar en la botella grande, las moléculas se moverán en todas las direcciones, llenándola completamente. El hecho que las moléculas ocuparon todo el espacio de la botella significa que se distribuyeron lo más homogéneamente posible o lo más aleatoria posible, en la cual todas las localizaciones tienen la misma posibilidad.

Basados en este ejemplo, podemos acertar algunas definiciones. Para empezar, las moléculas de gas y el contenedor forman un sistema que se mueve desde un *estado inicial* a un *estado final*. El estado inicial es cuando las moléculas entran en la botella y llegan al estado final cuando se han estabilizado en la nueva botella más grande. El problema consiste en explicar el paso desde el estado inicial al estado final, dado que conocemos dónde estaban las moléculas en la botella pequeña pero ignoramos su distribución en la botella más grande.

Imaginariamente dividamos las botellas en dos compartimentos. Más aún, supongamos que el número de moléculas es 6 y que en la distribución original de la botella pequeña hay 4 en un compartimento y 2 en el otro. Al entrar en la botella más grande, las moléculas pueden moverse libremente a cualquier compartimento. El problema consiste en encontrar la distribución más probable de las moléculas al final de proceso. La siguiente tabla muestra todos los resultados posibles:

Estados finales posibles

	1	2	3	4	5	6	7
Compartimento 1	6	5	4	3	2	1	0
Compartimento 2	0	1	2	3	4	5	6
No de permutaciones	1	6	15	20	15	6	1
Total	64						

Para que el estado final sea 6-0 sólo pudo haber pasado una cosa: que las moléculas del compartimento 2 en el estado inicial se movieron todas al compartimento 1. Para obtener el resultado final 5-1 hay mucho más posibilidades, tales como 1 molécula de 2 se mueve a 1, o 2 moléculas de 1 se mueven a 2 y 1 de 1 se mueve a 2, y así sucesivamente, con un total de 6 posibilidades. Para obtener el resultado 4-2 hay 15 combinaciones y así las demás. Al final el número de combinaciones es $2^6 = 64$. La respuesta a cuál es el estado final más probable es bastante obvia ya que el resultado 3-3 se obtiene con el mayor número de permutaciones, 20 veces más probable que los estados finales menos probables.

Desde este punto de vista, entropía es el grado de probabilidad del estado final de un sistema. Los resultados posibles (7 en el ejemplo) se denominan como *macroestados* y cada una de las permutaciones (64 en el ejemplo) se denominan como *microestados*. Cada macroestado, entonces, se obtiene con un uno o más microestados, y el macroestado más probable es aquel que se asocia al mayor número de microestados. Sin embargo, en la medida que la probabilidad de un macroestado se incrementa, la incertidumbre acerca de cuál fue el microestado que lo generó también se incrementa. En el ejemplo, no hay incertidumbre acerca de cómo se generó el macro estado 6-0 porque sólo hay una posibilidad. Pero cuando consideramos el resultado 5-1 hay 6

maneras de obtenerlo y no hay nada para decidir cuál de ellas fue. En el extremo, la entropía es máxima cuando la incertidumbre también es máxima.

En el ejemplo, el grado de ‘dominación’ del estado más probable respecto al menos probable fue de 20 a 1. Cuando consideramos sistemas más complejos, es decir, con más moléculas y más compartimentos, el grado de dominación puede crecer de manera considerable. También es posible introducir al sistema información adicional en la forma de restricciones. En el ejemplo, el hecho que el estado inicial era 4-2 limita el número de permutaciones. Si sabemos, por ejemplo, que el máximo número de moléculas que caben en un compartimento es 5, entonces los estados finales 6-0 y 0-6 quedan descartados, reduciéndose el número de permutaciones a 62 e incrementando la dominancia del resultado 3-3. Como conclusión, a medida que se incrementa el número de elementos y el número restricciones, la dominación del estado final más probable también se incrementa, haciendo que sea más fácil de predecir que un sistema más simple.

Para aplicar estos conceptos a la interacción espacial, Wilson (1970) considera un ejemplo de una tabla origen-destino de viajes hogar-trabajo. Una matriz T_{ij} representa una distribución específica de personas viajando desde sus hogares a sus lugares de trabajo. Supongamos que conocemos el número de trabajadores en cada zona O_i así como el número de puestos de trabajo en cada zona D_j . Hay muchas matrices posibles que sumarán a los orígenes y destinos dados. Los siguientes son sólo dos ejemplos:

	$D_j =$					$D_j =$			
	3	1	1	5		4	0	1	5
	5	2	1	8		3	2	3	8
	2	2	4	8		3	3	2	8
$O_i =$	10	5	6	21		10	5	6	21

En ambos casos el número de orígenes y destinos es el mismo, para un total de 21. Estas tablas son sólo dos de un gran número de posibilidades de matrices T_{ij} que suman al número de orígenes y destinos dados. Cada matriz T_{ij} representa un macroestado que puede ser generado por un gran número de microestados. El problema es encontrar el T_{ij} que está asociado con el máximo número de microestados, asumiendo *a priori* que todos son igualmente posibles, y que lo siguiente se puede introducir como restricciones:

$$\sum_j T_{ij} = O_i \quad (3-6)$$

$$\sum_i T_{ij} = D_j \quad (3-7)$$

$$\sum_{ij} T_{ij} c_{ij} = C \quad (3-8)$$

Las restricciones (3-6) y (3-7) son parte de la definición original del problema, ya que la suma de las columnas de la matriz T_{ij} debe ser igual a los orígenes dados (3-6) y la suma de las filas debe ser igual a los destinos (3-7). Se ha agregado una nueva restricción (3-8) que establece que hay un costo total para todo el sistema de transporte, C , y que éste debe ser igual a la suma de todos los viajes origen-destino multiplicado por sus respectivos costos c_{ij} . Esto equivale a introducir una restricción de energía total en el ejemplo anterior: las moléculas pueden moverse libremente de un compartimento a otro, pero al hacerlo consumen energía cuya suma total está fija. Este monto total de dinero a gastar en transporte corresponde a un macroestado de un nivel más alto, ya que muchas matrices pueden cumplir con esta restricción.

Si T es el número total de viajes ($T = \sum_{ij} T_{ij}$), el número total de combinaciones que generan un T_{ij} puede calcularse de la siguiente manera: primero seleccionar T_{11} de T , luego T_{12} de $T - T_{11}$ y así sucesivamente. En otras palabras, el número de posibles asignaciones es el número de maneras de seleccionar T_{11} de T , que lo denotaremos como $C_{T_{11}}^T$ multiplicado por el número de maneras de seleccionar T_{12} de $T - T_{11}$ que denotaremos como $C_{T_{12}}^{T-T_{11}}$ y así sucesivamente. Si decimos que W representa el número total de asignaciones posibles, entonces:

$$W = C_{T_{11}}^T C_{T_{12}}^{T-T_{11}} C_{T_{13}}^{T-T_{11}-T_{12}} \dots \quad (3-9)$$

de tal manera que:

$$W = \frac{T!}{T_{11}! (T - T_{11})} \frac{(T - T_{11})!}{T_{12}! (T - T_{11} - T_{12})} \dots = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \quad (3-10)$$

El T_{ij} que maximiza W sujeto a las restricciones (3-6), (3-7) y (3-8) puede obtenerse con el método estándar de maximización restringida. Para ello se maximiza el Lagrangian $\mathcal{L}$:

$$\mathcal{L} = \ln W + \sum_i \tau_i^1 (O_i - \sum_j T_{ij}) + \sum_j \tau_j^2 (D_j - \sum_i T_{ij}) + \beta (C - \sum_{ij} T_{ij}) \quad (3-11)$$

donde τ_i^1 es el multiplicador de Lagrange asociado a la restricción (3-6), τ_j^2 es el multiplicador asociado a (3-7) y β es el asociado con (3-8). Los T_{ij} s que maximizan $\mathcal{L}$ y que por lo tanto son la distribución de viajes más probable son las soluciones de:

$$\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta T_{ij}} = 0 \quad (3-12)$$

junto con las restricciones (3-6), (3-7) y (3-8). Maximizando el $\ln W$ en lugar de W , y utilizando la aproximación de Stirling:

$$\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta T_{ij}} = -\ln T_{ij} - \tau_i^1 - \tau_j^2 - \beta c_{ij} \quad (3-13)$$

La Ecuación (3-13) será cero cuando:

$$T_{ij} = \exp(-\tau_i^1 - \tau_j^2 - \beta c_{ij}) \quad (3-14)$$

Sustituyendo (3-14) en las ecuaciones de restricción (3-6) y (3-7) y re-arreglando:

$$\exp(-\tau_i^1) = O_i \left[\sum_j \exp(-\tau_j^2 - \beta c_{ij}) \right]^{-1} \quad (3-15)$$

y

$$\exp(-\tau_j^2) = D_j \left[\sum_i \exp(-\tau_i^1 - \beta c_{ij}) \right]^{-1} \quad (3-16)$$

Por conveniencia definimos:

$$A_i = \exp(-\tau_i^1) / O_i \quad (3-17)$$

y

$$B_j = \exp(-\tau_j^2) / D_j \quad (3-18)$$

Entonces:

$$T_{ij} = O_i D_j \exp(-\beta c_{ij}) A_i B_j \quad (3-19)$$

donde:

$$A_i = \left[\sum_j B_j D_j \exp(-\beta c_{ij}) \right]^{-1} \quad (3-20)$$

y

$$B_j = \left[\sum_i A_i O_i \exp(-\beta c_{ij}) \right]^{-1} \quad (3-21)$$

De esta manera A_i satisface la restricción (3-6) y B_j satisface (3-7). Las ecuaciones (3-19), (3-20) y (3-21) representan el modelo de interacción espacial de maximización de la entropía en su forma más general. Wilson, sin embargo, derivó cuatro casos diferentes, dependiendo de la información disponible:

Doble restricción. Corresponde al caso de máxima información, ya que tanto los orígenes O_i como los destinos D_j son conocidos. Este es el caso descrito en las ecuaciones (3-19), (3-20) y (3-21), sujeto a las restricciones (3-6) y (3-7). Nótese que los términos A_i y B_j son mutuamente dependientes, de tal manera que hay que resolverlos iterativamente: primero hacemos todos los $B_j = 1$ en (3-20) y calculamos los valores de A_i , luego reemplazamos éstos en (3-21) para obtener nuevos valores de B_j , y repetimos el procedimiento hasta lograr una convergencia numérica.

Restringido en el origen. En este caso sólo se conocen los orígenes de los flujos, pero no los destinos. Sólo es válida la restricción (3-6) y el término D_j de-

be ser reemplazado por una hipótesis acerca de la atractividad de cada zona, W_j . Entonces:

$$T_{ij} = O_i W_j \exp(-\beta c_{ij}) A_i \quad (3-22)$$

donde:

$$A_i = \left[\sum_j B_j W_j \exp(-\beta c_{ij}) \right]^{-1} \quad (3-23)$$

Restringido en el destino. En este caso sólo se conocen los destinos de los flujos, pero no los orígenes. Sólo es válida la restricción (3-7) y el término O_i debe ser reemplazado por una hipótesis acerca de la atractividad de cada zona, W_i . Entonces:

$$T_{ij} = W_i D_j \exp(-\beta c_{ij}) B_j \quad (3-24)$$

donde:

$$B_j = \left[\sum_i W_i \exp(-\beta c_{ij}) \right]^{-1} \quad (3-25)$$

Sin restricciones. Este es el caso de mínima información en que no se conocen ni los orígenes ni los destinos, y por lo tanto ninguna de las dos restricciones aplica. Entonces:

$$T_{ij} = W_i W_j \exp(-\beta c_{ij}) \quad (3-26)$$

3.4 Algunas formas específicas de modelos de interacción espacial

Las aplicaciones de los modelos de interacción espacial son muy numerosas, de manera que aquí se presentan sólo algunos ejemplos. Primero se presentan modelos relacionados con la representación de flujos, seguido por modelos de la localización de actividades. Se ha cambiado la formulación original para adaptarla a la de las secciones precedentes.

3.4.1 Modelos de flujos

Uno de los modelos de flujos más conocidos es el modelo de distribución y separación de Wilson (1970), que está basado en el tipo de doble restricción que se describió anteriormente. El objetivo del modelo es estimar el número de viajes desde los orígenes i a los destinos j por el modo k y tipo de población n , T_{ij}^{kn} . El tipo de población se refiere a disponibilidad de automóvil ($n=1$ disponible, $n=2$ no disponible). Los inputs para el modelo son orígenes de viajes por tipo de población, O_i^n , y el número de destinos en cada zona D_j así como matrices de costos de transporte por modo, c_{ij}^k . Entonces:

$$T_{ij}^{kn} = O_i^n D_j \exp(-\beta c_{ij}^k) A_i^n B_j \quad (3-27)$$

donde:

$$A_i^n = \left[\sum_j \sum_{k \in n} D_j B_j \exp(-\beta c_{ij}^k) \right]^{-1} \quad (3-28)$$

y

$$B_j = \left[\sum_j \sum_n \sum_{k \in n} A_i^n O_i^n \exp(-\beta c_{ij}^k) \right]^{-1} \quad (3-29)$$

La expresión $k \in n$ indica que la suma se realiza sobre todos los modos k disponibles para la población tipo n . Si, por ejemplo, se consideran dos modos – público y privado – los no propietarios de auto están forzados a elegir el primero, mientras los con automóvil disponible pueden elegir ambos.

3.4.2 Modelos de localización de actividades

Uno de los primeros modelos de localización de actividades se debe a Hansen (1959) para simular la localización de residentes en un área urbana. El modelo supone que ha habido un incremento de población, dR , que debe ser localizado a las zonas en función de la accesibilidad. La accesibilidad se mide como:

$$V_i = \sum_j M_j \exp(-\beta c_{ij}) \quad (3-30)$$

donde M_j representa el número de actividades atractoras en la zona j , como el número de empleos, servicios, etc. Para tomar en cuenta el tamaño de cada zona Hansen propuso la siguiente ecuación de localización:

$$dR_i = dR \frac{L_i V_i}{\sum_i L_i V_i} \quad (3-31)$$

donde dR_i es el incremento de la población en la zona i y L_j es el suelo vacante disponible en la zona i .

Más adelante Lakshmanan y Hansen (1965) propusieron un modelo para simular la localización potencial de comercio. Expresado en términos de un modelo restringido en el origen, el flujo de gasto en compras desde una zona residencial en i a un centro comercial en j , S_{ij} , es:

$$S_{ij} = R_i e_i W_j A_i \exp(-\beta c_{ij}) \quad (3-32)$$

donde:

$$A_i = \left[\sum_j W_j \exp(-\beta c_{ij}^k) \right]^{-1} \quad (3-33)$$

en donde e_i es el gasto promedio per cápita en compras de la población en la zona i , y W_j es una variable que representa el atractivo del centro comercial en la zona j , generalmente en términos de área de venta.

Quizás el más popular de todos los modelos de interacción espacial es el de Lowry (1964). Define un sistema urbano como compuesto por un sector de empleo básico, un sector de empleo de servicio y un sector de población. El empleo básico en cada zona E_i^b es exógeno al modelo, y el propósito del modelo es estimar la población en cada zona, R_i y los empleos de servicio, E_i^s , que se deriva de la localización del empleo básico. Otras variables exógenas son el suelo disponible en cada zona, L_i y una matriz de costos de transporte, c_{ij} .

La principal contribución de Lowry es que definió varios sub-modelos relacionados entre sí en una estructura iterativa, lo cual permite una estructura más compleja. La Figura 3-1 muestra la forma en que se estructuran los sub-modelos. Expresado en términos de modelos restringidos en el origen, el cálculo se realiza en las siguientes etapas o pasos:

Paso a) Agregar al empleo básico en cada zona, el empleo de servicio calculado en la iteración previa. En la primera iteración el empleo de servicio a sumar es cero. Si E_i^* denota al empleo total, entonces:

$$E_i^* = E_i^b + E_i^s \quad (3-34)$$

Localizar los residentes en cada zona j a partir de los empleos en la zona i :

$$R_{ij} = E_i^* u L_j A_i \exp(-\beta^r c_{ij}) \quad (3-35)$$

donde:

$$A_i = \left[\sum_j L_j \exp(-\beta^r c_{ij}^k) \right]^{-1} \quad (3-36)$$

y donde R_{ij} es el número de residentes que se localizan en j y trabajan en i , y u es la razón entre población y empleo. El término A_i asegura que se localiza el número correcto de población, es decir, $\sum_j R_{ij} = E_i u$. El parámetro β^r regula el efecto que tienen los costos de transporte sobre la localización residencial. Un valor muy alto de β^r tendrá como efecto que la población se localizará lo más cerca posible de los lugares de empleo. En el límite, cuando $\beta^r \rightarrow \infty$ toda la población vivirá y trabajará en la misma zona. Si el valor de β^r es bajo, la población se distribuirá más lejos alrededor de los lugares de empleo. En el límite, si $\beta^r = 0$ los costos de transporte no juegan ningún rol y la población se localiza únicamente en función del suelo disponible con la misma densidad. El término R_{ij} representa el flujo de residentes desde los lugares de trabajo a los lugares de residencia. Para obtener el número total de residentes en cada zona, se debe sumar respecto a los lugares de trabajo:

$$R_j = \sum_i R_{ij} \quad (3-37)$$

Paso b) Localizar el empleo de servicio en zonas j a partir de la población en las zonas i:

$$E_{ij}^s = R_i v A_i (W_j)^\alpha \exp(\beta^s c_{ij}) \quad (3-38)$$

donde:

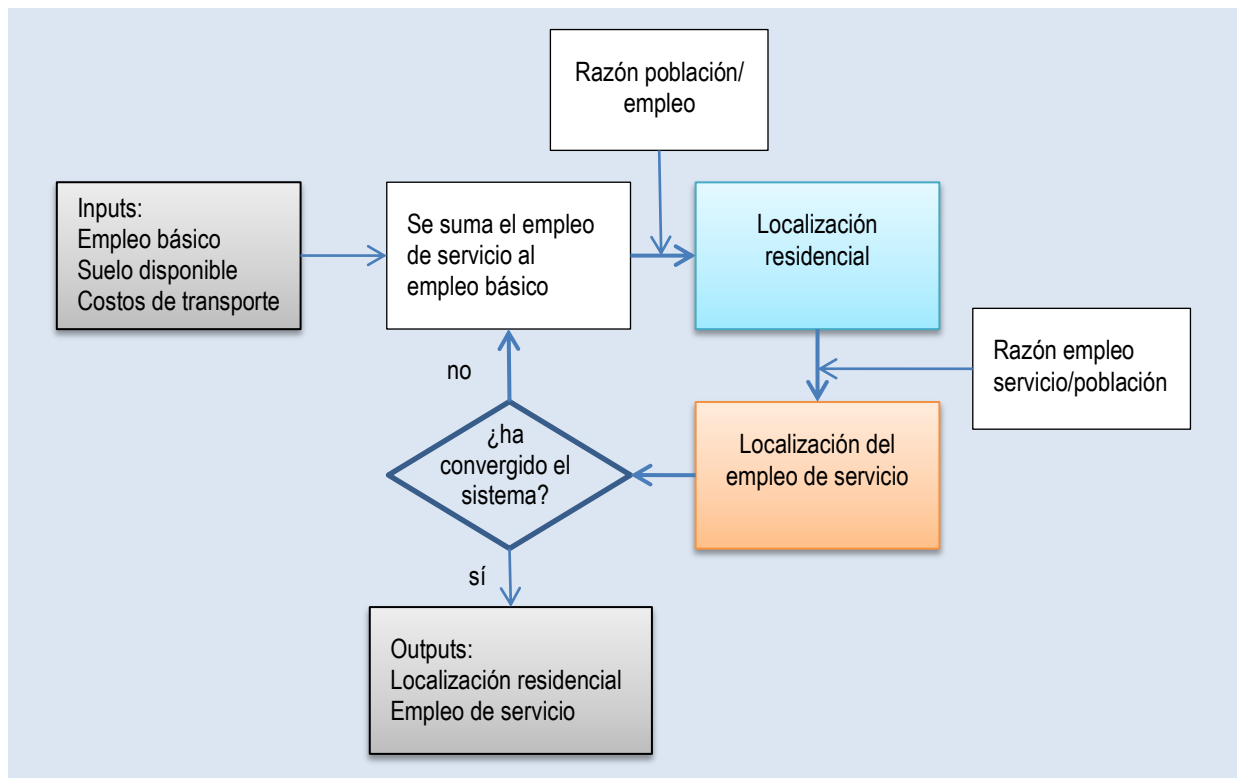
$$A_i = \left[\sum_j (W_j)^\alpha \exp(-\beta^s c_{ij}) \right]^{-1} \quad (3-39)$$

y donde v es la razón entre empleo y servicio y población, W_j es un término atractor para el empleo de servicio en términos del empleo de servicio localizado en la iteración anterior para representar la tendencia del servicio a aglomerarse. Esto es regulado por el parámetro α por lo cual se le suele llamar parámetro de economías de escala. Si sumamos los flujos hogar-servicios respecto de los orígenes, obtendremos los empleos de servicio localizados en cada zona:

$$E_j^s = \sum_i E_{ij}^s \quad (3-40)$$

La secuencia de cálculo vuelve al paso a) donde el empleo de servicio obtenido en la ecuación (3-40) es sumado al empleo básico. En cada iteración se agrega una cierta cantidad de población y empleo de servicio, pero este número es cada vez más pequeño, lo cual permite una convergencia luego de un número razonable de iteraciones.

Figura 3-1: Estructura del modelo de Lowry



Diversas mejoras se le hicieron al modelo de Lowry. Garin (1966) produjo una interesante interpretación matricial del modelo, aportando útiles consideraciones y permitiendo una solución directa, sin iteraciones, por inversión de la matriz (esto es, sin embargo, menos eficiente en términos computacionales). Echenique (1968) introdujo un modelo de espacio construido, en un intento de incorporar un sector de oferta. Observó que la densidad de espacio construido decae exponencialmente desde el centro de la ciudad. La densidad residencial tiende a ser más bien baja cerca del centro debido a la competencia con otras actividades, principalmente con el empleo de servicios. Consecuentemente, Echenique divide la estructura del modelo de Lowry en dos partes: localización del espacio construido y localización de las actividades. De esta manera se supone que el empleo determina la localización del espacio construido, y una vez localizado, las actividades residenciales y de servicio compiten por su uso, donde las últimas tienen preferencia sobre las primeras. Como resultado, en la primera iteración el centro puede atraer mucha población, para ser desplazada por el empleo de servicio en las iteraciones siguientes.

Ha habido varios intentos para desagregar algunas variables del modelo de Lowry, con la población dividida en varios grupos de ingreso y el empleo de servicio en varios sectores. Baxter y Williams (1973, 1975) trabajaron bastante el modelo residencial. Comenzaron simplemente agregando otro índice a R_{ij} en (3-35) e introdujeron espacio construido residencial F_j en vez de suelo disponible L_j . Esto significa que todo el stock residencial es igualmente atractivo para los residentes de cualquier grupo. Los

autores luego descartaron este supuesto al introducir varios tipos de espacio residencial en una formulación de doble restricción.

Wilson (1974) también intentó una desagregación del modelo residencial, suponiendo que tanto los trabajadores E_j y el número de viviendas H_j son conocidos. Con esto se puede construir un modelo de doble restricción de la forma:

$$R_{ij} = H_i E_j \exp(-\beta c_{ij}) A_i B_j \quad (3-41)$$

donde A_i y B_j se definen de la manera habitual. Luego Wilson propone un modelo híbrido para áreas urbanas de rápido crecimiento, considerando cuatro casos posibles:

Caso 1: un grupo de residentes bien establecidos, cuya localización y lugares de trabajo son conocidos. Este caso puede resolverse con un modelo de doble restricción (3-41).

Caso 2: residentes cuyo lugar de vivienda es conocido pero están buscando trabajo, lo cual se maneja con un modelo restringido en el origen

Caso 3: residentes que tienen un puesto de trabajo pero están buscando vivienda, que se representa con un modelo restringido en el destino

Caso 4: población completamente indefinida que no tienen ni vivienda ni trabajo fijos, lo cual se representa con un modelo sin restricciones.

De esta descripción Wilson deriva un gran número de restricciones que son luego introducidas a la formulación de máxima entropía. El autor propone un modelo que asigna trabajadores de diversos ingresos w en una zona i a viviendas tipo k en las zonas j , R_{ij}^{kw} , utilizando un mecanismo que asegura que el gasto en transporte y vivienda no exceden unos máximos para cada grupo de ingreso. El precio de las viviendas es dado.

El modelo de servicios también puede ser desagregado, introduciendo distintos tipo de empleo de servicio, tales como comercio, salud, finanzas, educación, comercio, etc. También es posible distinguir entre el empleo de servicios generado por la población y el generado por el empleo (el modelo original de Lowry hace esto). El problema con estos modelos es que se torna difícil calcular los muchos coeficientes servicios-población y servicios-empleos. Esta información no existirá nunca ya que es imposible preguntar a un comercio, por ejemplo, a cuál grupo de ingreso le vende y en qué proporción. Es posible, sin embargo, hacer estimaciones indirectas, como por ejemplo utilizar el ingreso medio de cada grupo para dar pesos a los coeficientes.

3.5 Comparación entre los modelos micro-económicos y los de interacción espacial

Como conclusión a este capítulo, resulta de utilidad resumir las principales diferencias entre los modelos microeconómicos y los de interacción espacial. La comparación se divide entre aspectos teóricos y aspectos matemáticos/operativos.

3.5.1 Aspectos teóricos

Los modelos espaciales microeconómicos, como se ha dicho, centran su análisis alrededor de individuos, clasificados como consumidores (hogares o empresas) o suplidores (terratenedores y empleadores). Estos actores se enfrentan en el mercado, compitiendo por suelo. Alcanzado el equilibrio se asigna todo el suelo, los consumidores maximizan su utilidad sujetos a restricciones presupuestarias, y la oferta maximiza sus ganancias. Más aún, el suelo es asignado de la manera más eficiente posible. En otras palabras, los modelos microeconómicos de usos del suelo sacan partido del análisis del consumidor y disfrutan de una base teórica sólida.

Los modelos de interacción espacial tienen una estructura teórica más débil. De hecho empezaron con hipótesis bastante crudas, y han ido adquiriendo contenido teórico en el camino, proceso que continúa hasta el día de hoy.

Estos dos enfoques llaman a una discusión mucho más amplia y fundamental. Los modelos microeconómicos comienzan con construcciones muy abstractas, y luego proceden en un proceso deductivo para acercarse a la realidad. Por contraste, los modelos de interacción espacial han sido esencialmente empíricos, comenzando por hipótesis primitivas (como una simple analogía), sometiendo los modelos a pruebas empíricas. Nuevos modelos emergen como resultado de las pruebas, con nuevas hipótesis que reemplazan a las anteriores, creando así, teoría en el camino.

El resultado de esto es que los modelos microeconómicos han tenido mucha influencia en el desarrollo de la teoría urbana, pero no han provisto herramientas útiles para el análisis de casos reales. Como lo describe Anas (1982) *‘por esta razón las aplicaciones de planificación de transporte y modelación urbana, que deberían beneficiarse de la economía urbana, se han mantenido distanciadas.’* En otras palabras, se puede argumentar que el enfoque microeconómico, siguiendo la ruta tradicional del método deductivo, puede ser muy consistente mientras viaje en el espacio sin fricciones de la abstracción, pero enfrenta graves dificultades al menor intento de aplicarlo a casos reales.

Un tema más específico en esta comparación de enfoques es el problema del equilibrio. Los modelos microeconómicos están pensados para representar mercados, donde la competencia perfecta hace que todos los actores logren sus objetivos, proceso que es estable mientras perduren las condiciones externas. Los modelos de interacción espacial no tienen este concepto, donde a veces se busca un equilibrio numérico para desarrollar los cálculos (como en el modelo de Lowry). En los modelos de interacción espacial no hay ninguna garantía que, por ejemplo, la demanda de espacio construido sea igual a la demanda. Ni hay definiciones acerca de precios de ninguna de las mercancías, ni siquiera del suelo. De hecho, puede haber fuertes desbalances en los elementos de demanda-oferta, una condición que por definición es imposible en los modelos de Von Thünen, Wingo o Alonso.

Estos puntos requieren mucho más discusión, pero por los momentos diremos que es tanto una debilidad como una fortaleza de los modelos de interacción espacial. Es un beneficio, porque se puede modelar satisfactoriamente diversidad de casos reales, cualquiera que sea el nivel de perfección de los mercados reales. Es una debilidad, ya

que los mecanismos de mercado, por débiles o imperfectos que sean, existen y pueden ser muy importantes, por lo cual siempre deberían estar explícitos en nuestros modelos. Si se va a utilizar los modelos de interacción espacial como herramientas para la simulación y evaluación de cursos alternativos de acción, es bastante obvio que no sólo se requiere un buen modelo de localización, ya que si no conocemos cómo se afectan los mercados inmobiliarios no es posible estimar los impactos que tendrán los planes sobre la comunidad urbana.

También se ha criticado la forma en que los modelos microeconómicos tratan a los individuos. El supuesto que todos los individuos son perfectamente racionales, que siempre tomarán las decisiones que maximizan su utilidad, y que todos los individuos poseen la misma y perfecta información acerca del sistema real, es frecuentemente señalado como poco realista. Los individuos, en realidad tienen información limitada, a menudo toman decisiones sobre la base de eventos futuros estimados. Tampoco son perfectamente racionales, entre otras cosas porque es difícil establecer qué es 'racional', y en idénticos términos para todos los individuos.

Los modelos de interacción espacial no hacen ningún supuesto acerca del grado de racionalidad de los actores involucrados, especialmente si consideramos el enfoque de maximización de la entropía. En esencia, este enfoque supone que los individuos se comportarán de la manera más aleatoria posible. Por definición, el estado final es precisamente aquel en el que conocemos menos acerca del comportamiento de los individuos que lo generaron. Esto sería completamente fuera de la realidad si no fuera por la restricción (3-8). Lo que está diciendo esta restricción es que los individuos se comportarán de manera lo más aleatoria posible, pero que sólo están dispuestos a gastar una cierta cantidad en transporte. En otras palabras, son moléculas aleatorias pero que cuidan su dinero.

3.5.2 Aspectos matemáticos y operativos

Los modelos microeconómicos y los de interacción espacial también siguen tradiciones matemáticas diferentes. Los modelos microeconómicos están relacionados con matemáticas continuas, como ecuaciones diferenciales, mientras los modelos de interacción espacial recurren a matemáticas discretas y algoritmos. Aquí argumentamos que las matemáticas discretas son más poderosas y flexibles, y que ésta es la clave para el éxito de los modelos de interacción espacial a la hora de aplicaciones reales. Las ventajas de las formulaciones discretas no sólo permiten mejores cálculos, sino que tienen una influencia positiva sobre las propias teorías. El hecho que las teorías pueden llegar a ser operativas permite un importante *feedback* o retroalimentaciones múltiples entre realidad y teoría, un aspecto que fue destacado en el Capítulo 1.

Esta discusión es especialmente relevante en análisis de sistemas, en donde se hace una clara distinción entre modelos continuos versus discretos. Barto (1978) argumenta que la tradición de las ciencias clásicas, relacionadas con continua y tasas de cambio, y por lo tanto a ecuaciones diferenciales, se ha desarrollado en un relativo aislamiento con relación a nuevos científicos influenciados con la computación digital, y por lo tanto, *'les parece más natural pensar en términos de algoritmos, estructuras de datos y autómatas'*. Es el *análisis numérico* la rama de las matemáticas que se ocupa

de interpretar los problemas tradicionales en física, ingeniería, estadísticas o economía, en términos de cálculos numéricos o algoritmos que un computador puede interpretar y resolver. En este sentido Barto señala que *‘aunque el objeto del análisis numérico se centra en la relación entre métodos continuos y discretos, la perspectiva que provee yace plenamente en la tradición continua.’* El análisis numérico hace de traductor de formulaciones continuas en discretas.

Tómese como ejemplo un modelo desarrollado por ingenieros para calcular la resistencia de una estructura de un puente, considerando las propiedades de los materiales, las cargas esperadas, temperaturas, condiciones del viento, y otros. Este modelo es representado con ecuaciones diferenciales continuas. El análisis numérico proveerá una traducción del modelo continuo en términos discretos para que se pueda introducir en un computador, porque estas máquinas de cálculos son esencialmente de naturaleza discreta.

Dado que el análisis numérico se ha ocupado largamente de proveer interpretaciones discretas de modelos continuos, los principales indicadores de desempeño indican cuan cerca estuvo la versión discreta de su original continuo, más que la calidad de la interpretación del sistema real. Cuestiones tales como rangos de error y el grado de aproximación al modelo original a medida que el nivel de resolución (*step size*) aumenta, le son prioritarios. En lugar de esto, debe intentarse una interpretación directa del sistema real, soslayando completamente la formulación continua. Este emergente enfoque *directo* pone el énfasis en la relación entre el modelo y el sistema real percibido, más que en cuan bien se ha interpretado el modelo continuo. Van Valkenbourg (1974) argumenta que la interpretación de las ecuaciones diferenciales debe ser evitado: *‘dada la amplia disponibilidad de computadores, las ecuaciones deben utilizarse lo menos posible, ya que los principios pueden representarse directamente en forma algorítmica.’* Cuando se adopta el enfoque discreto desde el comienzo, los principales indicadores de desempeño se relacionan con el grado de desagregación de la data disponible y el grado de detalle que requiere el analista o el problema. Aún si al final el modelo discreto derivado directamente se termina pareciendo a su antecesor continuo, el hecho que fuera derivado directamente, según Barto, *‘hace que una parte importante del análisis numérico sea irrelevante’*. No es necesario seguir enfrentando el complejo problema de cuánto se ha aproximado a la ecuación diferencial. Lo importante es cuánto se parece el modelo a la data disponible.

En muchas disciplinas se están imponiendo modelos discretos para resolver problemas que antes se abordaban con ecuaciones diferenciales, haciendo no sólo que sean más fáciles de procesar en un computador, sino también preservando el atractivo teórico de los modelos clásicos. Más aún, esta tendencia reciente no sólo permite hacer operativas a las formulaciones clásicas tradicionales, ya que los modelos computacionales permiten la exploración de clases de problemas enteramente nuevos. El análisis de sistemas debe determinar el enfoque analítico más conveniente en función de las propiedades del problema, en lugar de sesgos metodológicos a priori. Más aún, debe evitar que estos sesgos determinen cuáles son los principales problemas a analizar.

En síntesis, el nuevo concepto de modelación y validación sostiene que éstos sólo deben referirse a un conjunto particular de atributos (bases de datos) que son de interés para el analista (problema), lo cual conforma su marco experimental. En este sentido un modelo puede ser válido para un marco experimental, pero no para otros.

El carácter discreto de estos modelos no significa que el sistema real deba tener estas propiedades. Por ejemplo, un modelo que trate la variable tiempo como discreta (períodos discretos de tiempo) no significa el tiempo en la realidad sea discreto, de la misma manera que un modelo continuo no está verificando que el tiempo sea continuo en la realidad. Ambas son interpretaciones intelectuales de la naturaleza del tiempo, tal que el analista debe escoger la interpretación que mejor sirve sus intereses, o el que mejor interprete el conjunto de atributos reales.

Un modelo discreto, por otra parte, es más flexible que un modelo continuo. La Figura 3-2 muestra dos formas de representar un sistema real. En la Figura 3-2(a), la curva A representa los atributos del sistema real, por ejemplo una distribución de frecuencia de una variable real observada. La curva B es una representación continua, que intenta replicar el sistema real A lo mejor posible. La curva C es un modelo discreto que intenta replicar cercanamente al modelo continuo. Debido a que el modelo continuo sólo puede escoger entre un grupo limitado de funciones conocidas, se pierden la mayoría de las peculiaridades del sistema real. El resultado es que B no es una representación muy buena de A. Si la curva C está diseñada para acercarse al modelo continuo, el resultado es que el modelo discreto puede ser peor que el continuo. Más aún, si se incrementa el nivel de resolución como en C', no se logra mejoría alguna.

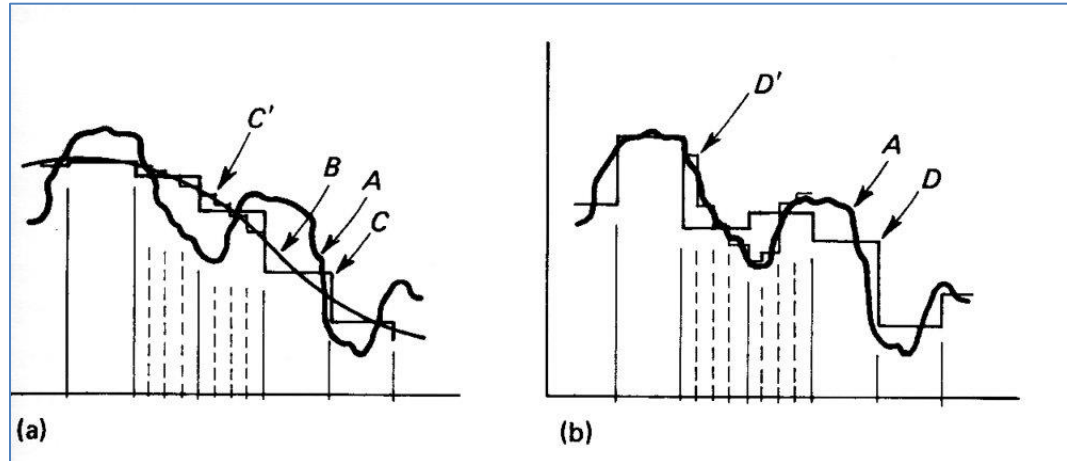
La Figura 3-2 muestra las ventajas del enfoque discreto directo D, soslayando el modelo continuo. Dado que el modelo discreto no está limitado a una familia de curvas conocida, puede lograr una aproximación a la realidad mucho mayor. Como es de esperar, al mejorar la resolución, el modelo puede acercarse aún más a la realidad. El modelo discreto basado en algoritmos es mucho más flexible porque puede ir cambiando de naturaleza a medida que representa una variable. Puede interpretar el sistema real con un procedimiento como el siguiente: primero asuma una función exponencial hasta que llegue a un valor x, luego siga lineal hasta alcanzar un valor de y; luego salte 300% con una función potencial. Nótese que el algoritmo puede contener funciones continuas, mejorando aún más sus capacidades. El algoritmo puede, además, variar el nivel de resolución e incluir condiciones lógicas tales como si-entonces, de lo contrario, vaya a, y otras instrucciones lógicas.

Esta discusión es particularmente relevante para las ciencias sociales en general, y a la ciencia urbano y regional en particular. Los distintos modelos que se han presentado hasta aquí obedecen a una u otra tradición. En general se puede decir que los modelos microeconómicos siguen la tradición continua, particularmente en el tratamiento del espacio, ingreso y otras. Por otra parte los modelos de interacción espacial consideran el espacio y la mayoría de las variables como variables discretas, con un acceso fácil a la verificación empírica.

Esto no quiere decir que los modelos microeconómicos de usos del suelo no pueden ser verificados por su naturaleza continua. Es en efecto factible construir aproximaciones y probarlas, pero los resultados probablemente sean decepcionantes. Para

evitar esto en el próximo capítulo se presenta y discute la teoría de las decisiones discretas, tomándolos como la base para construir modelos mixtos microeconómicos/interacción espacial, para combinar las ventajas teóricas de los primeros con las facilidades empíricas de los últimos.

Figura 3-2: Interpretación discreta de sistemas reales



(a)- Análisis numérico, (b)- Enfoque discreto. A=atributos reales; B=representación continua; C=interpretación discreta de B con baja resolución; C'=interpretación discreta de B con alta resolución; D=interpretación discreta de A con baja resolución; D'=interpretación discreta de A con alta resolución.

4 Teoría de utilidad aleatoria y modelos discretos de escogencia

En el Capítulo 2 se presentó y discutió el enfoque microeconómico para representar un sistema espacial. Aunque estos modelos tienen un fuerte contenido teórico, la naturaleza de las hipótesis simplificadoras, su representación matemática, y sus dificultades operacionales los ha limitado a un nivel de propuestas teóricas, sin herramientas útiles para el investigador ni el profesional práctico. Las principales dificultades de este enfoque pueden resumirse de la siguiente manera:

- a) Se supone que tanto los usuarios como los oferentes tienen información perfecta acerca de las condiciones del mercado. Información limitada sería un supuesto más realista.
- b) Tanto los demandantes como los oferentes tienen funciones de utilidad determinísticas. Enfrentados a las mismas opciones, siempre harán las mismas elecciones. En vez de esto se debería considerar variaciones en el comportamiento individual.
- c) Tanto oferentes como demandantes tienen movilidad sin fricción: pueden aparecer o desaparecer sin costo. Una dinámica restringida producirá resultados más realistas.
- d) No hay ninguna metodología para agregar las funciones de demanda o de oferta. Con una población grande, esto hace que sean imprácticos. Si para resolver esto el analista aplica un modelo individual a grandes grupos de población o empresas, los resultados serán poco realistas porque suponen que todo el grupo presentará un único comportamiento idéntico.

Los modelos de interacción espacial, como se explicó en el Capítulo 3, fueron derivados por maximización de una función de entropía, sujeta a ciertas restricciones conocidas. Las distribuciones resultantes, como se ha señalado, son las menos prejuiciadas acerca del sistema objeto de la modelación, es decir, son las que hacen menos supuestos acerca del comportamiento del sistema, aparte de lo que se incluye y refleja en las restricciones. Como observa Williams (1977b), el método se corresponde con un procedimiento de agregación estadística, y se considera que cualquier variabilidad en el comportamiento de los individuos proviene de diversas fuentes que no se hacen explícitas. *‘No está en el espíritu del método el asignar las variaciones a una fuente en particular, ya que esto sería información adicional que puede explotarse en la formulación del modelo. La metodología, por naturaleza, crea modelos más descriptivos que causales, porque las principales fuentes de variabilidad no están sujetas a una explicación casuística.’*

Hay, sin embargo, tres razones para buscar una interpretación causal. En primer lugar si los modelos de interacción espacial pueden interpretarse en términos causales (económicos), se puede obtener una mejor explicación, y en especial, se puede esta-

blecer una relación entre el comportamiento del sistema a un macro-nivel y el comportamiento de los individuos. En segundo lugar, si aceptamos que en el mundo real los individuos se comportan racionalmente, aunque de manera limitada, será posible simular el funcionamiento de los mercados, como suelo, superficie construida, transporte, servicios, etc. De esta manera, los modelos teóricos derivados de la teoría microeconómica pueden integrarse con los modelos de interacción espacial agregados. Finalmente, si asume un comportamiento de racionalidad limitada en el proceso de toma de decisiones que resulta en estructuras espaciales específicas, se puede hacer explícita la utilidad que estos individuos perciben de dichas decisiones. Esto quiere decir que si los modelos de interacción espacial pueden interpretarse en términos de costos, utilidades y elasticidades, se pueden identificar y estimar las medidas de beneficio a los usuarios.

En las secciones siguientes se presenta la teoría de utilidad aleatoria y los modelos de elección discretos. Se comienza por describir los principios teóricos básicos y la derivación del modelo general. Luego se desarrolla el concepto de cadenas de decisión para mostrar la forma en que se pueden construir modelos complejos. Finalmente se discuten tres aspectos relacionados: costos variables, elasticidades y jerarquías.

4.1 Teoría de decisiones: el caso individual

En términos generales la teoría de decisiones describe los procesos sociales como un conjunto de decisiones que toman los individuos. El supuesto principal es que los individuos escogen racionalmente entre las opciones que están disponibles para ellos, sujetos a restricciones tales como el ingreso, bagaje cultural, y otros. Por ejemplo, si un hogar decide comprar una vivienda, tendrá diversas opciones que varían en precio, tamaño, tipo y localización, y numerosas restricciones tales como la gama de opciones en oferta en ese momento, y el presupuesto que dispone el hogar. Los hogares individuales elegirán entre las opciones disponibles y accesibles, la que le brinde el mayor grado de satisfacción.

Cada individuo evalúa el grado de satisfacción potencial o utilidad de cada una de las opciones disponibles. Luego las ordena en términos del grado de satisfacción o utilidad percibida en cada caso y elige la que le provee la mayor utilidad. La utilidad, por su parte, es un concepto subjetivo: su percepción variará de un individuo a otro, y de una elección a otra.

Matemáticamente la utilidad puede ser representada como una función para un individuo y opción determinados, que contiene variables que describen atributos medibles de cada opción. Enfrentado a un conjunto de opciones en particular, se puede suponer que el individuo evaluará cada opción con la misma función de utilidad. La utilidad derivada de cada opción puede definirse como:

$$u^{sk} = U^s(X^k, S^s) \quad (4-1)$$

donde u^{sk} representa el nivel de utilidad que un individuo s percibirá si elige la opción k . U^s es una función de utilidad que el individuo s aplica a todas las opciones similares disponibles para él, esto es, para todas las $k \in B^s$, el conjunto de opciones. Se entiende que B^s contiene sólo las opciones que el individuo puede pagar y que son

sustitutos, es decir, son opciones alternativas que cumplen una función similar. X^k es el conjunto de atributos medibles de cada opción k , y S^s representa las características socioeconómicas y culturales del individuo s .

Si más aún se asume que las características socio-culturales del individuo están implícitas en la función de utilidad, entonces la ecuación (4-1) se simplifica a:

$$u^{sk} = U^s(X^k) \quad (4-2)$$

La opción elegida será k si $U^s(X^k)$ es mayor que la de cualquier otra opción dentro del conjunto B^s , esto es, si:

$$U^s(X^k) > U^s(X^q), \quad \forall q \in B^s, q \neq k \quad (4-3)$$

La expresión (4-3) produce una única solución, y es aproximadamente equivalente al modelo microeconómico, y por lo tanto está sometido a las críticas a) a d) al principio de este capítulo. En particular, es de poco valor práctico porque sería imposible llevar registro de la función de utilidad de millones de personas que habitan una ciudad o región, y también porque el número de opciones puede ser enorme. Para que todo este análisis tenga sentido, hay una urgente necesidad de agregación. Los individuos deben ser agrupados de acuerdo a sus características socioeconómicas, y las opciones deben ser reducidas a grupos discretos.

4.2 Teoría de decisiones: el caso agregado

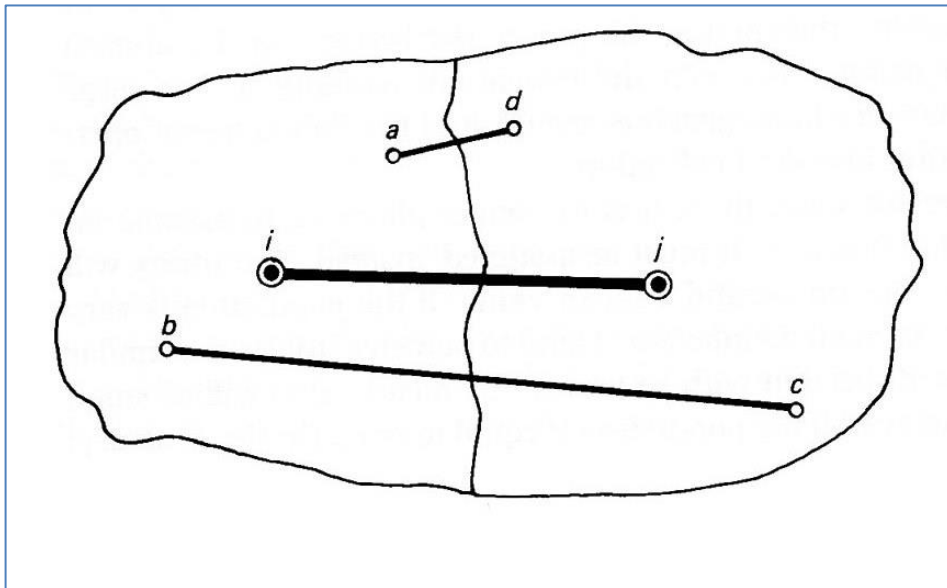
Se dijo que, aún en el caso individual, la utilidad no puede ser una función determinística, porque un mismo individuo puede comportarse de maneras diferentes cada vez. Cuando consideramos el caso agregado, en que la función de utilidad se refiere a una población de individuos que escogen entre grupos de opciones, las variaciones en la percepción de la utilidad pueden ser demasiado importantes como para ignorarlas. Naturalmente mientras menor sea el grupo, menor serán las variaciones, pero el analista deberá hacer un balance entre la dificultad de trabajar con un gran número de grupos pequeños relativamente homogéneos y las dificultades de operación, calibración y recolección de datos.

En el caso agregado, entonces, ya no será plausible suponer una función de utilidad invariable. En su lugar debe suponerse que, dentro del grupo decisor, la utilidad varía en torno a un valor medio. Si la población es muy homogénea, entonces todos los miembros tenderán a percibir la utilidad de una manera similar, y por lo tanto la dispersión en torno a la media será pequeña (nunca cero, incluso si la población es igual a uno). Por el contrario, si la población es grande, las variaciones en torno a la media también serán grandes.

Hay muchas *fuentes de variabilidad* a medida que los grupos crecen en tamaño. La lista propuesta por Domencich y McFadden (1975) puede ser completada con la de Williams (1977a) y con el propio autor:

- a) Variaciones intra-individuales. No necesariamente los individuos perciben la utilidad de manera idéntica en cada ocasión, e incluso si lo hacen, pueden tomar acciones diferentes.

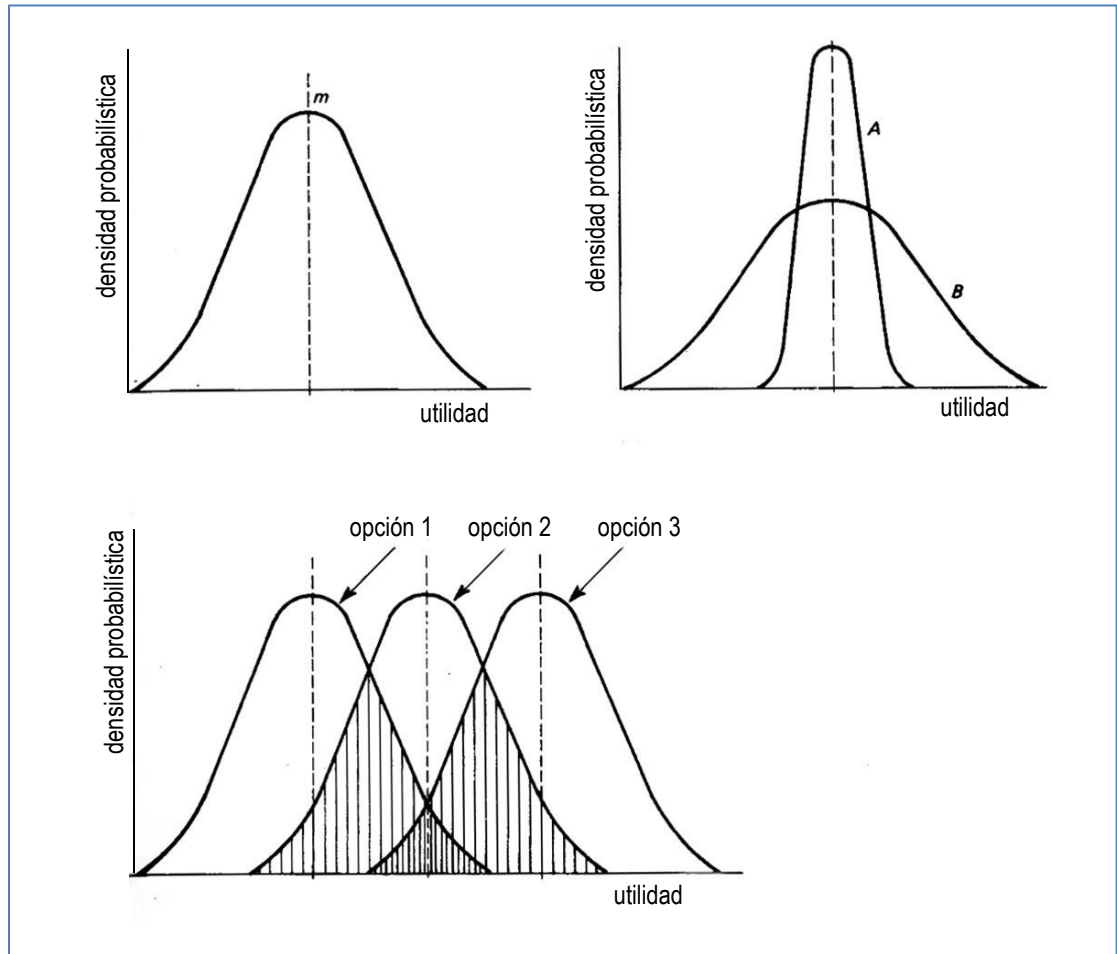
- b) Variaciones intra-opciones. Las opciones a escoger no se presentan necesariamente de manera idéntica todos los días. Los buses pueden llegar tarde un día, temprano otros. Una bicicleta puede ser una opción muy atractiva para un viaje corto en la temporada adecuada, pero no en un día lluvioso.
- c) Los individuos que conforman el grupo no necesariamente tienen la misma información acerca los atributos de cada opción.
- d) La función de utilidad del modelo puede estar incompleta. Puede ser que las variables principales están bien representadas, pero puede haber otras de menor importancia que no están en el modelo, y que explican variaciones en el comportamiento de los individuos miembros del grupo.
- e) La localización exacta de cada individuo dentro de una zona agregada puede variar, tanto respecto a la zona de origen de una interacción como de la zona de destino. Considérese el ejemplo de la Figura 4-1 con dos individuos de un mismo grupo que viajan de una zona i a una zona j . Para un modelo determinístico los atributos medibles de la función de la utilidad percibida será el mismo para ambos individuos. Sin embargo, un individuo que viaja de a a d percibirá un costo menor que uno que lo hace de b a c .
- f) Otra fuente importante de variabilidad es la posición exacta de cada individuo dentro de su grupo. Así, por ejemplo, si hemos definido el grupo como las personas con ingreso entre 1000 y 3000, el comportamiento de un individuo de ingreso 1100 puede ser muy diferente a uno de 2900.
- g) El criterio para definir los grupos no será nunca enteramente satisfactorio. Si hemos utilizado el ingreso para clasificar los individuos, seguramente estaremos dejando de lado otros elementos importantes, tales como el nivel de educación, cultura, etnia, y otros. En el caso de la agregación espacial, los límites de las zonas obedecen a muchos elementos arbitrarios.
- h) No siempre los individuos escogerán la opción de mayor utilidad, aunque pueden estar conscientes de ello, porque pueden estar limitados por algún otro factor. Por ejemplo, si se ha introducido un cambio importante en el sistema de transporte, un hogar puede percibir que ya no vive en el lugar óptimo, pero el costo de comprar una nueva casa y mudarse a ella puede superar la diferencia en el costo percibido de transporte. También puede que el hogar se sienta atado al lugar por razones de vecindario, amistad, costumbres.

Figura 4-1: Variabilidad en la percepción de los costos de transporte

La agregación, entonces, introduce fuentes de variabilidad a la forma en que cada individuo miembro de la población decisora percibe la utilidad. Esto resultará en una distribución en la percepción de la utilidad para todo el grupo. La Figura 4-2(a) muestra un ejemplo de distribución de la utilidad percibida para una población hipotética respecto a una opción específica. La mayor parte de la población percibirá un nivel de utilidad m , que es el valor medio para toda la población. Otros miembros asignarán un valor mayor o menor alrededor de este valor medio. Si el grupo es pequeño y homogéneo, las variaciones también serán pequeñas, lo cual da lugar a una distribución estrecha y empinada como la curva A en la Figura 4-2(b). Si el grupo es grande y heterogéneo, la curva resultante será mucho más ancha y plana como la curva B.

La Figura 4-2(c) muestra lo que ocurre en la percepción de la utilidad cuando el grupo se enfrenta a tres opciones. Dado que cada individuo evalúa las opciones con los mismos criterios, la forma de la curva de distribución de la utilidad deberá ser idéntica en los tres casos, moviéndose de derecha a izquierda de acuerdo a la opción. En general curvas más a la derecha serán preferidas, pero hay importantes solapes en las curvas, que se muestran con sombreados en la figura, y que explican por qué la población se distribuye entre las opciones, aunque no en las mismas proporciones.

Figura 4-2: Distribución de las utilidades percibidas



Matemáticamente, si la ecuación (4-2) representa la función utilidad determinística para un individuo, la función de utilidad agregada para una población debe incluir un elemento aleatorio:

$$u^{sk} = U^s(X^k, \xi) \quad (4-4)$$

Donde ξ representa la variación aleatoria en la percepción de la utilidad. Ya no habrá un resultado único: la introducción de fuentes de variabilidad significa que todas las opciones pueden ser escogidas por algún miembro individual de la población. Entonces se puede asignar una probabilidad a cada opción. La probabilidad P^{sk} de que una opción k será seleccionada por la población s será:

$$P^{sk} = \text{Prob}[U^s(X^k, \xi) > U^s(X^q, \xi)], \forall q \in B^s, q \neq k \quad (4-5)$$

El elemento aleatorio ξ puede ser eliminado de la función de utilidad si se entiende que la función misma es aleatoria. Más aún, la función de utilidad puede dividirse en dos componentes: una función determinística $V^s(X^k)$, que representa sus atributos medibles o *utilidad estricta*, y un componente estocástico $\mu^s(X^k)$:

$$U^s(U^k) = V^s(X^k) + \mu^s(X^k) \quad (4-6)$$

Lo que significa que (4-5) puede transformarse en:

$$P^{sk} = Prob[\mu^s(X^k) - \mu^s(X^q) > V^s(X^k) - V^s(X^q)], \forall q \in B^s, q \neq k \quad (4-7)$$

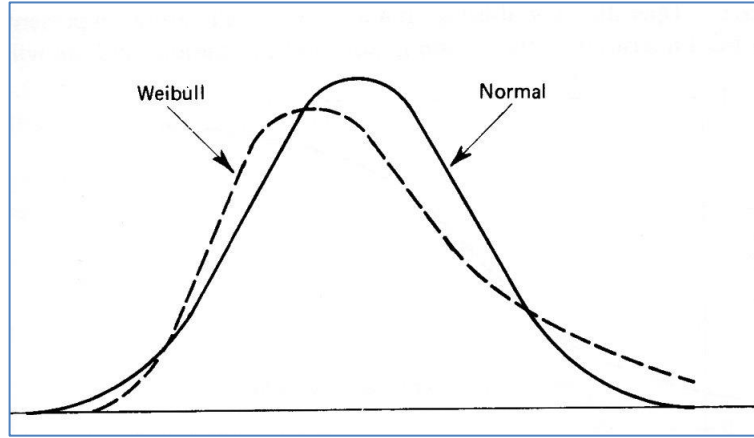
Si se asume que μ^s representa el grado de variación entre los individuos de la población pero no entre las opciones, entonces todos los μ^s tendrán distribución conjunta. Si $\tau(t^1, \dots, t^N)$ es la distribución conjunta acumulativa de $\mu^s(X^1, \dots, X^N)$, y τ^k es la k -ésima derivada de τ entonces la probabilidad de que la opción k sea seleccionada será la integral de (4-7):

$$P^{sk} = \int_{-\infty}^{+\infty} \tau^k(t + V^{sk} - V^{s1}, \dots, t + V^{sk} - V^{sN}) dt \quad (4-8)$$

La ecuación (4-8) representa el modelo básico para simular decisiones discretas bajo el supuesto de utilidades aleatorias. De este modelo genérico se pueden derivar muchas formas específicas, dependiendo de la forma que adoptemos para la distribución conjunta τ .

Domencich y McFadden (1975) estudiaron extensamente las principales funciones estadísticas para representar τ . Las distribuciones mejor conocidas son la normal, logística y la Cauchy, que luego de la integración generan los modelos probit, logit y arcotangente respectivamente. Los autores exploraron y sometieron a extensas pruebas las tres distribuciones, especialmente para los rangos más significativos, evitando los valores extremos (cerca de 0 o cerca de 1). Si se considera un modelo con dos opciones, los autores argumentan que si $U^s(X^1)$ y $U^s(X^2)$ tienen la misma distribución conjunta, por consistencia la distribución de las diferencias $U^s(X^1) - U^s(X^2)$ también debe tener la misma forma. Desde este punto de vista, si $\mu^s(X^1)$ y $\mu^s(X^2)$ son normales, entonces $\mu^s(X^1) - \mu^s(X^2)$ también debe tener una distribución normal, y similarmente para la distribución Cauchy.

La distribución logística no tiene esta propiedad, pero puede resolverse reemplazándola por una distribución Weibull, que también genera un modelo logit. La diferencia entre una distribución normal y una Weibull se presenta en la Figura 4-3 que resultan bastante similares. Aparte de la estabilidad a la suma que se discutió más arriba, las distribuciones Weibull tienen una propiedad que es de especial relevancia para este caso: la distribución de los máximos de distribuciones Weibull también es una distribución Weibull, lo cual es particularmente interesante para un modelo de maximización de la utilidad. Basando en estas y otras propiedades, los autores señalan que la Weibull debe ser la distribución preferida, con el respectivo modelo logit.

Figura 4-3: Comparación entre las distribuciones Normal y Weibull

La cuestión si el modelo debe ser probit o logit sigue siendo materia de debate. Los modelos logit son mucho más simples y fáciles de calibrar, pero algunos autores (Daganzo, 1980) argumentan que el modelo probit produce resultados más realistas, porque no están afectados por el problema de la correlación entre atributos entre las opciones, lo cual hace que el esfuerzo adicional valga la pena. Este punto será discutido más adelante.

Si la distribución es Weibull, el modelo multinomial logit resultante es:

$$Pr^{sk} = \frac{\exp(V^{sk} - \alpha^k)}{\sum_q \exp(V^{sq} - \alpha^q)} \quad (4-9)$$

donde α^k es un parámetro que puede ser absorbido en la definición de V^{sk} sin pérdida de generalidad. Si, además, introducimos un parámetro explícito a la función exponencial, la forma final del modelo es:

$$Pr^{sk} = \frac{\exp(\beta^s V^{sk})}{\sum_k \exp(\beta^s V^{sk})} \quad (4-10)$$

Cochrane (1975) hace una derivación similar del modelo, pero asume desde el principio que la distribución acumulativa de la distribución de la probabilidad conjunta τ puede ser aproximada con una función exponencial, como se muestra en la Figura 4-4, llegando así, luego de integración, al mismo modelo multinomial logit. Cochrane, sin embargo, agrega un importante corolario a esto al señalar que si el modelo es de la forma (4-10) entonces la utilidad conjunta o beneficio promedio para la población decisora luego de distribuirse entre las opciones es:

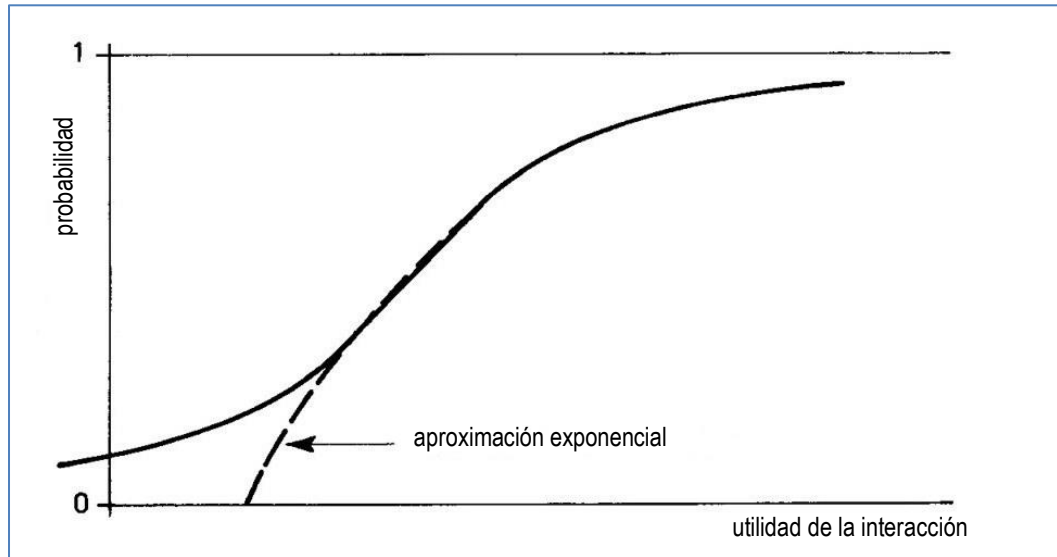
$$S^s = \frac{1}{\beta^s} \ln \left[\sum_k \exp(\beta^s V^{sk}) \right] \quad (4-11)$$

donde S^s es el beneficio promedio percibido por el grupo s o *costo compuesto*. Más aún, como lo señala Williams (1977a) si comparamos dos escenarios alternativos, por ejemplo $\bar{A}$ y $\bar{B}$, la diferencia en beneficios, ΔS^s será:

$$\Delta S^s = \frac{1}{\beta^s} \ln \left[\frac{\sum_k \exp(\beta^s V^{sk}) \bar{B}}{\sum_k \exp(\beta^s V^{sk}) \bar{A}} \right] \quad (4-12)$$

El indicador ΔS^s es conceptualmente equivalente al indicador tradicional del *excedente al consumidor*, pero ayuda a resolver muchos problemas relacionados con la evaluación. Williams (1977a) hace una completa revisión del trabajo de Domencich y McFadden, así como el de Cochrane, agregando una serie de consideraciones adicionales de interés. En particular Williams enfatiza que, si se acepta que el modelo correcto para simular las decisiones de una población de individuos es (4-10), no hay grados de libertad acerca de cuál debe ser el indicador de beneficios: debe ser (4-11) y (4-12). Esta formulación tiene la ventaja adicional de una total integración entre simulación y evaluación económica y, como se verá en la próxima sección, puede tener un efecto muy importante en los resultados de un proyecto.

Figura 4-4: La aproximación exponencial de la distribución de utilidad de Cochrane



4.3 Algunas propiedades de los modelos discretos de decisiones

Para comenzar, vale la pena notar algunas características del parámetro β^s . Si en un modelo específico la función de utilidad X^k representa costos, entonces el parámetro será negativo. El valor absoluto está relacionado con el grado de dispersión de la distribución de la utilidad. Si el parámetro es grande y negativo, indica que los individuos que forman el grupo están de acuerdo acerca de cuál es la mejor opción (la de menor costo). El parámetro también está relacionado con el nivel de agregación de los grupos involucrados: si el grupo decisor es pequeño y homogéneo, el valor absoluto del parámetro será grande. En el límite, cuando la población del grupo se reduce a una

sola persona y el tamaño de la zona se reduce hasta transformarse en un punto, el valor del parámetro será menos infinito si se trata de costos, y el modelo será equivalente al modelo microeconómico determinístico. Esta es una consideración de gran importancia. En un modelo residencial, por ejemplo, si el área está dividida en unas pocas zonas de gran tamaño, la calibración determinará un valor del parámetro pequeño, mientras lo contrario ocurrirá si el área se divide en muchas zonas pequeñas.

Por otro lado, si hay varias opciones k , una de ellas representará la opción de menor costo, digamos k^* . A medida que β^s tiende a infinito, la probabilidad de escogencia de la opción de menor costo, P^{sk^*} tiende a 1. En la medida que β^s tiende a cero, todas las probabilidades se hacen iguales, esto es, $P^{sk} = 1/N^s$ donde N^s es el número de opciones disponibles para el grupo s . Para ilustrar este punto, considérese el ejemplo numérico presentado en la Tabla 4-1 más abajo, donde un caso de dos opciones con costos 5 y 8 son evaluados para dos grupos de población representados por dos valores de $\beta^s = -0.2, -0.6$.

Puede verse que la población con baja sensibilidad al costo, es decir, $\beta^s = -0.2$ la probabilidad de la opción de menor costo (=5) es 0.6457. Por contraste la población con alta sensibilidad al costo, con $\beta^s = -0.6$, es 0.8581. Como resultado el costo promedio $\bar{c}$ pagado por el grupo de alta sensibilidad será menor que el grupo de menor sensibilidad (5.42 contra 6.06) debido a que una proporción mayor elige la opción de menor costo.

La Tabla 4-1 también presenta los valores de la utilidad promedio S^s calculados con la ecuación (4-11). En este caso el grupo de baja sensibilidad muestra un costo compuesto mucho menor para el mismo conjunto de opciones (2.81 contra 4.75). Debido a que este grupo es menos sensible al costo, estará mejor que otros al enfrentar opciones relacionadas con costo, aún si paga un costo medio más alto. En general puede observarse que, a medida que el valor absoluto del parámetro se incrementa, también lo hace la desutilidad promedio o costo compuesto. En el límite, cuando β^s es menos infinito, la probabilidad de elegir la opción de menor costo es 1.0 y la utilidad promedio convergerá al costo de esa opción, es decir, =5. Nótese que si el conjunto contiene una sola opción, el resultado de la ecuación (4-11) será siempre el costo de la única opción, para cualquier valor del parámetro, con $\bar{c} = S^s$.

Tabla 4-1: Ejemplo numérico para demostrar el efecto del parámetro de dispersión

v^{sk}	β^s	$\exp(\beta^s v^{sk})$	p^{sk}	$\bar{c}$	$S^s(\text{ec. (4-11)})$
5	-0.2	0.3679	0.6457		
8		0.2019	0.3543		
Total		0.5698	1.0000	6.0629	2.1826
5	-0.6	0.0498	0.8581		
8		0.0082	0.1419		
Total		0.0580	1.0000	5.4257	4.7450

Supongamos ahora que se introduce una nueva opción más cara =12 al conjunto de opciones, con lo cual la Tabla 4-1 se transforma en Tabla 4-2. Como puede verse, 14% de la población de baja sensibilidad al costo escoge la nueva opción, con sólo 1% del grupo de alta sensibilidad. Como resultado el costo promedio del grupo de baja sensibilidad sube de 6.06 a 6.88, mientras que el otro grupo sólo muestra un incremento de 5.42 a 5.51. El indicador de utilidad promedio o costo compuesto muestra que ambos grupos han mejorado cuando se introduce la nueva opción, pero que el grupo de menor sensibilidad se beneficia más, porque la desutilidad se mueve de 2.81 a 2.07, mientras el grupo de mayor sensibilidad se mueve apenas de 4.75 a 4.72.

Tabla 4-2: Ejemplo numérico para demostrar el efecto de una nueva opción más cara

v^{sk}	β^s	$\exp(\beta^s v^{sk})$	p^{sk}	$\bar{c}$	$S^s(\text{ec. (4-11)})$
5	-0.2	0.3679	0.5570		
8		0.2019	0.3057		
12		0.0907	0.1373		
Total		0.6605	1.0000	6.8772	2.0738
5	-0.6	0.0498	0.8472		
8		0.0082	0.1401		
12		0.0008	0.0127		
Total		0.0588	1.0000	5.5092	4.7227

Ahora se puede aplicar la ecuación (4-12) para calcular el excedente al consumidor de cada grupo decisor, lo cual produce los siguientes resultados:

$$\text{baja sensibilidad} \quad \Delta S^s = \frac{1}{-0.2} \ln \left[\frac{0.6605}{0.5698} \right] = -0.7386$$

alta sensibilidad
$$\Delta S^s = \frac{1}{-0.6} \ln \left[\frac{0.0588}{0.0580} \right] = -0.0228$$

Los resultados demuestran claramente que el grupo de baja sensibilidad se beneficiará más con la introducción de la nueva opción más cara, aún si paga más dinero en la nueva situación. El lector puede verificar muy fácilmente estos resultados en una hoja de cálculo, y de esta manera puede comprobar lo que ocurre si se introduce una nueva opción de menor costo: ambos grupos estarán mucho mejor, y en este caso es el grupo de mayor sensibilidad el que recibirá una mayor cantidad de beneficios. Para calcular los beneficios totales, se debe multiplicar el excedente por la población de cada grupo. Si el ejemplo se refiere a una elección de modo, además deberá multiplicarse por el número de viajes que hace cada individuo en un año, lo cual se muestra en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Cálculo de los excedentes totales

	Grupo baja sensibilidad	Grupo alta sensibilidad
Población	1000	800
Viajes por año	380	450
ΔS^s	-0.7386	-0.0228
Pop * viajes * ΔS^s	-280 668	-8 208
Total excedentes anuales	288 876	

Estos resultados demuestran la importancia de los indicadores S^s y ΔS^s en la evaluación de políticas y proyectos. Tradicionalmente los proyectos de transporte han sido evaluados con criterios de ahorros en tiempo y costo, asumiendo que el mejor proyecto es el que demuestre un menor costo promedio $\bar{c}$. El ejemplo numérico anterior, así como el siguiente ejemplo que se va a presentar más abajo, demuestra que este criterio es una falacia. Una nueva opción siempre producirá beneficios, por pequeños que sean, y estos beneficios no serán los mismos para todos los grupos socioeconómicos. Es sorprendente que sin embargo sea el indicador $\bar{c}$ el que se usa en tantos estudios para la toma de decisiones.

El siguiente ejemplo numérico, que se presenta en la Figura 4-5, sirve para ilustrar estos argumentos aún más. El ejemplo presenta una situación inicial (a) en que el área de estudio ha sido dividida en tres zonas. La zona 1 está separada de las zonas 2 y 3 por un río, que no se puede cruzar. Los habitantes de la zona 1, conscientes de su aislamiento, presionan al gobierno para que se construya un puente con conexiones desde la zona 1 a las otras dos. Se contrata a un planificador para que estudie el tema y determine si la construcción del puente es conveniente.

Para evaluar esta situación, el planificador aplica un modelo residencial simple y lo calibra contra la situación actual (a). Luego alimenta el modelo con la situación hipotética (b) y compara los resultados. La forma del modelo, asumiendo un solo grupo socioeconómico, es la siguiente:

$$T_{ij} = \frac{E_i L_i \exp(-\beta c_{ij})}{\sum_j E_j L_j \exp(-\beta c_{ij})}$$

donde T_{ij} es el número de empleados que trabajan en i y viven en j , E_i es el número de empleos en i , L_i es el suelo disponible en i , c_{ij} es el costo de viajar entre las zonas i y j , y β es el parámetro de la utilidad.

El analista comienza por recopilar la información necesaria: $E_i = (100, 200, 50)$, $L_i = (30, 10, 20)$ y los costos que se derivan de las distancias medidas en un mapa, con costos internos de cada zona en 1, y el costo entre la zona 1 y las demás en infinito. Luego de la calibración, $\beta = 0.3$. Los resultados muestran que los 100 empleados que trabajan en la zona 1 no les queda otra que vivir también en la zona 1, y que hay una cierta proporción de personas que trabajan en la zona 2 y en la 3 y vice versas. Los resultados se muestran bajo la figura.

Luego, el analista alimenta el modelo con la información que describe la situación (b). La única diferencia es que ahora el puente está en operación, lo cual altera la matriz de costos. Aplicando el mismo modelo residencial, el analista obtiene una nueva matriz T_{ij} con una localización residencial diferente. Ahora, los residentes de la zona 1 pueden escoger dónde vivir, pero también los que trabajan en las zonas 2 y 3 tienen ahora la oportunidad de vivir en la zona 1 que antes no tenían. El resultado de esto, que se muestra en la Figura 4-5(b) es que los residentes son $R_j = (142, 107, 101)$. En otras palabras, la población que vivía en las zonas 2 y 3 se ha reducido, y se ha incrementado la población que vivía aislada en la zona 1. Es decir, el área urbana se ha expandido.

Para determinar cuál de las dos situaciones es mejor, al analista procede a estimar un indicador de accesibilidad, ya que este es el objetivo del puente propuesto. Para ello calcula el indicador tradicional de costos medios:

$$\tilde{c}_i = \sum_j T_{ij} c_{ij} / \sum_j T_{ij} \quad \text{y} \quad \tilde{c} = \sum_{ij} T_{ij} c_{ij} / \sum_{ij} T_{ij}$$

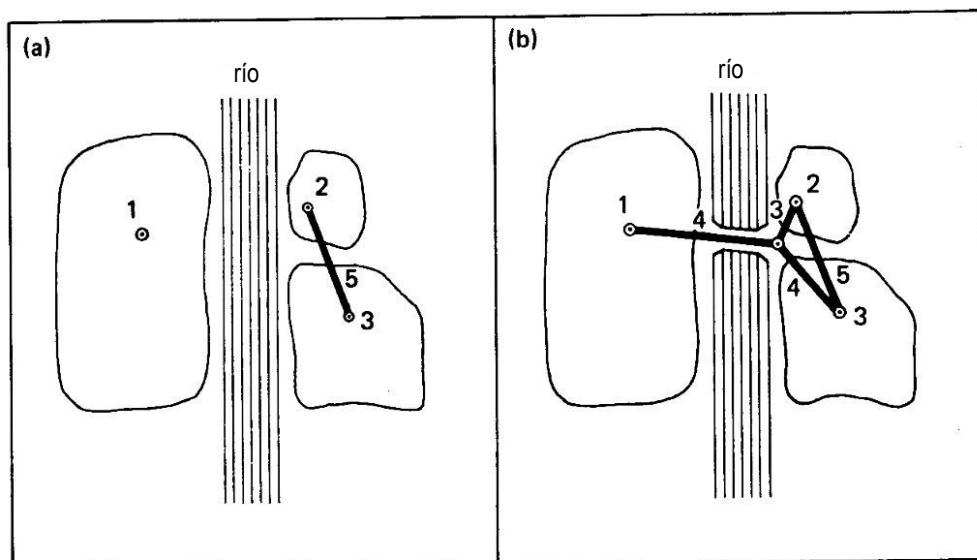
El primero es el costo medio de cada zona, y el segundo es el costo medio total. El analista encuentra que en la situación inicial los costos medios de transporte por zona son $\tilde{c}_i = (1.00, 2.48, 1.48)$ con un promedio de 1.91, los cuales se deterioran considerablemente en la situación con puente con $\tilde{c}_i = (1.79, 3.55, 2.46)$ con una media de 2.89. De acuerdo a estos resultados, el puente no debe construirse porque la población de las tres zonas viaja más y se incrementan los costos. El planificador rechaza el proyecto.

Para cualquiera que vea estos resultados los encontrará absurdos, porque el sentido común indica que el puente es una gran mejora respecto a la situación actual, especialmente si el costo del puente no entró en la evaluación. La anomalía ocurre porque la accesibilidad no está siendo medida correctamente. Si el planificador se hubiese educado en teoría de utilidad aleatoria, habría utilizado la (4-11) en lugar de los costos promedios, con lo cual los valores de la utilidad media en el caso (a) sin puente son (3.31, 5.42, 4.20) y pasan a (2.89, 4.53, 3.71) en el caso (b) con el puente, con promedios ponderados pasando de 4.64 a 3.94. En consecuencia, este planificador aprueba el proyecto, y más aún, está en condiciones de señalar que son los que traba-

jan en la zona 2 los principales beneficiados, al aplicar la ecuación (4-12) que produce como resultados (42.72, 179.75, 24.69). La razón por la cual los trabajadores de la zona 2 son los que más se benefician es que son la mayor concentración de empleo y tienen poco suelo, con lo cual el puente les abre una gran oferta de suelo que antes no tenían. Los empleados de la zona 3 no se benefician tanto porque ya tenían abundante suelo.

¡Al fin las decisiones de los planificadores coinciden con la apreciación intuitiva de los involucrados! Lo que es verdaderamente impactante es que el criterio del costo medio aún dictamina la mayoría de las decisiones hoy en día. Este criterio domina las metodologías de evaluación de proyectos de innumerables bancos mundiales y agencias internacionales de desarrollo involucrando grandes cantidades de dinero. Es verdad que un gran número de problemas de planificación no son tan dramáticos ni evidentes como el ejemplo aquí presentado, pero todo ejercicio de este tipo tendrá algún ingrediente de la anomalía descrita.

Figura 4-5: Ejemplo del río para ilustrar la forma en que se deben calcular los costos y los beneficios a los usuarios



	Empl.	Pobl.	Costo transp. c_{ij}		
	E_i	L_j	1	2	3
1	100	30	1	∞	∞
2	200	10	∞	1	5
3	50	20	∞	5	1

			1		
			1	2	3
$T_{ij} =$	1	100	0	0	
	2	0	125	75	
	3	0	7	43	
Población→		Σ	100	132	118

$c_i =$	Costo Prom		$S_i =$	Utilidad prom Ecu. 4.11	
	1.00	1		3.31	
	2.48	2		5.42	
	1.48	3		4.20	
$\tilde{c} =$	1.91		$S =$	4.64	

	Empl.	Pobl.	Costo transp. c_{ij}		
	E_i	L_j	1	2	3
1	100	30	1	7	8
2	200	10	7	1	5
3	50	20	8	5	1

			1		
			1	2	3
$T_{ij} =$	1	88	5	7	
	2	47	95	57	
	3	7	6	36	
Población→		Σ	142	107	101

$c_i =$	Costo Prom		$S_i =$	Utilidad prom Ecu. 4.11	
	1.79	1		2.89	
	3.55	2		4.53	
	2.46	3		3.71	
$\tilde{c} =$	2.89		$S =$	3.94	

		Excedente Ecu. 4.12	
$\Delta S_i =$	1	42.72	
	2	179.75	
	3	24.69	
$\Delta S =$		247.16	

4.4 Cadenas de decisiones

Los párrafos anteriores han tratado el caso de una sola elección. En un sistema urbano o regional, sin embargo, la población de un grupo puede tener que enfrentar un gran número de elecciones relacionadas entre sí. En términos analíticos, estas decisiones relacionadas pueden representarse como *cadenas de decisiones*. En un contexto urbano, por ejemplo, una cadena típica sería:

lugar de trabajo → lugar de residencia → lugar de compras → modo de transporte

Cada eslabón de esta cadena está claramente influenciado por el eslabón que lo precede. Por ejemplo, dónde ir de compras es una decisión que depende del lugar de residencia. Para representar una cadena de decisiones en un conjunto de modelos, cada componente debe preceder al siguiente en el orden correcto. Si el lugar de trabajo es un punto de inicio dado, cada enlace en la cadena estará representado por el correspondiente modelo de decisión, generando probabilidades tales como $P(r)$, $P(s)$, $P(m)$. La cadena de modelos será:

Lugar de trabajo → $P(r)$ → $P(s)$ → $P(m)$

De esta manera, el número de personas que van de compras en bus desde su lugar de residencia, dado que trabajan en determinado lugar se calcula como el número de personas que trabajan en esa zona $\times P(r) \times P(s) \times P(\text{bus})$. Esta forma resulta bastante confortable, porque es posible modelar cada eslabón por separado con modelos multinomiales logit separados, evitando así extensos cálculos simultáneos.

Para que esto sea posible, debe cumplirse una condición muy específica que fue definida por Luce (1959) como el axioma de la *independencia de las alternativas irrelevantes* (IIA). Este axioma requiere que la opción a escoger sea independiente de la presencia o ausencia de otras opciones no escogidas. En el ejemplo anterior, la escogencia de modo es independiente de las demás, ya que una vez se ha optado por un determinado lugar de compras, la escogencia del modo de transporte es completamente independiente.

Sin embargo el problema puede ser bastante más complejo, porque cada eslabón en la cadena influye sobre el que le precede. En el ejemplo anterior, es muy posible que la decisión de ir de compras a un determinado lugar se deba a que hasta allí hay un buen transporte público, tal que la escogencia de modo afecta la escogencia de lugar de compras. De manera similar la escogencia de localización residencial puede estar influenciada por la presencia cercana de centros comerciales.

Para representar estas cadenas adecuadamente, entonces, hay que comenzar por el último eslabón en la cadena y proceder hacia atrás. En el ejemplo, debemos calcular la utilidad agregada de la elección de modo desde los lugares de residencia a los de compra, esto es, el costo compuesto de viaje. Siguiendo a Williams (1977a) la manera correcta de hacer esto es aplicando la ecuación (4-11):

$$S^m = \frac{1}{\beta^m} \ln \left[\sum_k \exp(\beta^m V^k) \right] \quad (4-13)$$

donde S^m es la utilidad agregada de viaje, β^m es el parámetro de dispersión que regula la elección de modo, y V^k es la utilidad estricta de cada modo k . La suma se realiza sobre todos los modos k disponibles para la población decisora en cada par origen-destino.

Si suponemos, por simplicidad, que la utilidad estricta de los lugares de compra sólo contiene la utilidad de transporte, entonces la utilidad agregada de los lugares de compra para una elección de lugar de residencia será:

$$S^s = \frac{1}{\beta^s} \ln \left[\sum_m \exp(\beta^s S^m) \right] \quad (4-14)$$

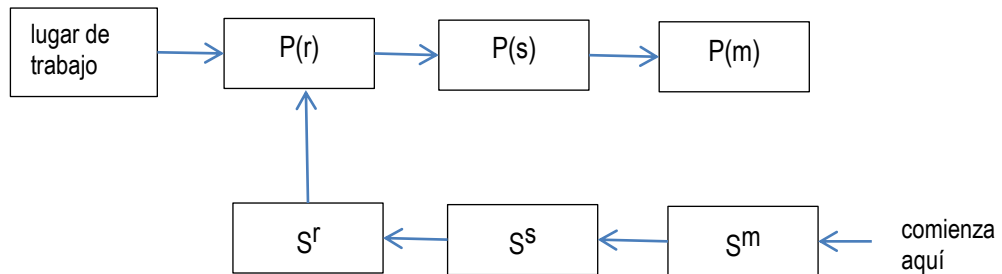
donde S^s es la utilidad agregada de los lugares de compra, β^s es el parámetro que regula la elección de lugares de compra y S^m es la utilidad estricta de los lugares de compra, calculada en (4-13), y donde la suma es sobre todos los lugares de compra disponibles desde cada lugar de residencia.

Finalmente, si nuevamente por simplicidad suponemos que la utilidad de cada lugar de residencia está determinada únicamente por la accesibilidad a lugares de compra, entonces la utilidad agregada de los lugares de residencia para un lugar de trabajo dado será:

$$S^r = \frac{1}{\beta^r} \ln \left[\sum_s \exp(\beta^r S^s) \right] \quad (4-15)$$

donde S^r es la utilidad agregada residencial, β^r el parámetro que regula la elección del lugar de residencia, y S^s es la utilidad estricta de cada lugar de residencia.

De esta manera se ha transferido el componente de transporte a la elección de lugar de compras, y de allí a la utilidad de los lugares residenciales. Al llegar a la cima de la cadena de decisiones, el procedimiento de cálculo se revierte y sigue la cadena en el sentido original, calculando las probabilidades:



Esta forma de ordenar y relacionar varios modelos a través de las utilidades agregadas se conoce como Modelos Multinomiales Logit Anidados (NML por su sigla en in-

glés). Es una estructura muy poderosa y flexible para la modelación de sistemas urbanos o regionales complejos.

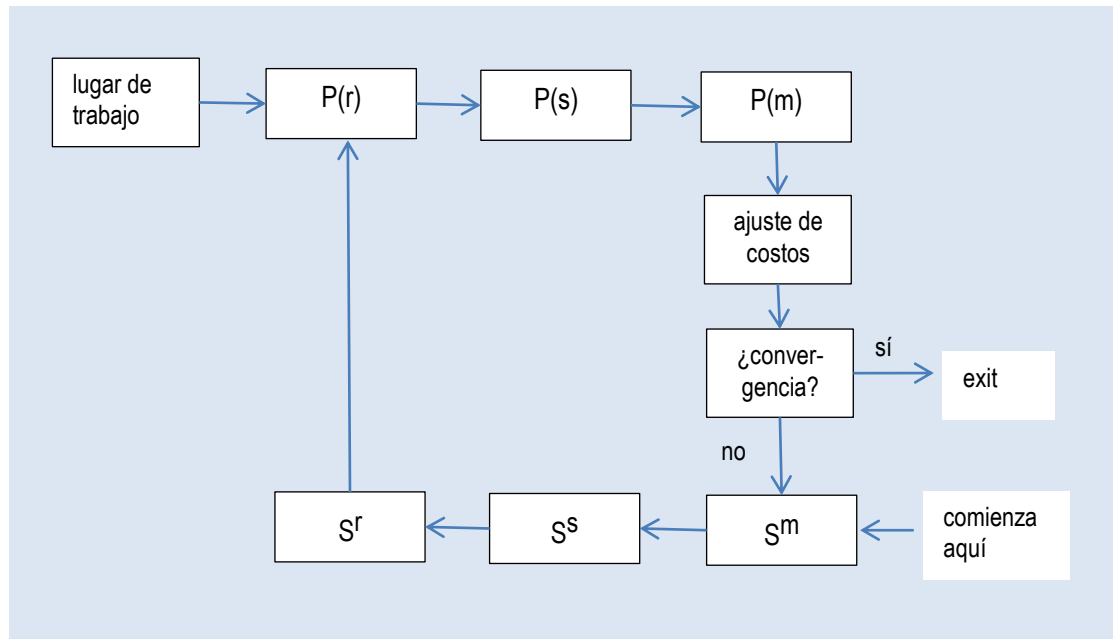
4.5 Costos variables y elasticidades

El proceso de cálculo descrito comienza por la agregación de las utilidades ‘aguas arriba’ en la cadena de decisiones y luego calcular las probabilidades ‘aguas abajo’. El procedimiento de cálculo terminaría aquí, si no fuera por la existencia de *costos variables y elasticidades*.

Los costos variables emergen porque algunos, sino todos, los eslabones de la cadena tienen capacidad limitada, y consecuentemente varían sus costos. En el ejemplo anterior puede ocurrir que la capacidad del servicio de autobús a un lugar de compra quede sobrepasada, lo cual incrementa los tiempos de espera y el costo, con lo cual eventualmente los usuarios pueden escoger otros lugares de compra. Este efecto queda reflejado en las utilidades de transporte y se trasladan a la elección del lugar de compras, y eventualmente a la utilidad de los lugares de residencia. A su vez, los lugares de compra pueden tener también problemas de capacidad, lo cual afecta la elección del lugar de compra para evitar el hacinamiento. Similarmente las zonas residenciales también tienen capacidad limitada, tal que una demanda muy alta puede incrementar los precios del suelo. Estos costos deben estar incluidos en la formulación de los modelos.

La elasticidad de la demanda también influye en el proceso. En el ejemplo, si la demanda por el servicio de autobús se incrementa demasiado, las personas pueden decidir reducir la frecuencia de los viajes a compras, una vez a la semana en vez de todos los días. En el caso de la localización residencial, a medida que suben los precios del suelo, los hogares pueden decidir consumir menos suelo, aumentando la densidad.

Para representar el fenómeno de los costos variables y las elasticidades, el proceso de cálculo debe tornarse iterativo. Primero se agregan las utilidades aguas arriba y se calculan las probabilidades aguas abajo como se describió anteriormente. Habiendo asignado toda la demanda a las opciones en cada eslabón, los costos deben ajustarse de acuerdo a las relaciones demanda/oferta. Si se han modificado los costos de las opciones, las utilidades agregadas deben re-calcularse en una nueva iteración, lo cual modificará la magnitud de la demanda y las escogencias entre opciones. Este procedimiento se repite varias veces hasta que se alcanza un criterio de convergencia. La convergencia puede medirse en términos del cambio en los precios en una iteración respecto a la iteración anterior. Si estas diferencias están por debajo de un *criterio de convergencia*, el procedimiento de cálculo termina. El procedimiento de cálculo modificado será así:



4.6 Jerarquías

Puede resultar conveniente en algunos casos el dividir un proceso de elección en subprocesos, lo cual da lugar a *jerarquías* en el proceso de toma de decisiones. Por ejemplo, la localización residencial puede dividirse en un primer nivel en qué distrito localizarse (norte, sur, este, etc.), y luego en un segundo nivel en qué sector específico localizarse. De manera similar la elección de modo de transporte puede dividirse en un primer nivel en transporte privado y público, y si es público puede haber un segundo nivel en que se elige entre autobús, metro, etc.

Estos niveles pueden representarse y estructurarse de la misma manera en que se representaron las cadenas de decisión, y el proceso de cómputo es el mismo. Nótese que aunque se trate de la misma decisión, por ejemplo, modo de transporte, el hecho que estén en dos o más niveles implica que los valores de los parámetros β en cada nivel serán diferentes.

El uso de jerarquías puede resultar muy útil, ya que permite que un proceso de elección se trate parcialmente a un nivel detallado, manteniendo el resto con un nivel de detalle menor. En el ejemplo residencial puede que interese la localización residencial a nivel de grandes distritos, y luego la localización detallada en un determinado distrito. Así, el analista ahorra en el esfuerzo de recopilación de información y en cómputos.

Debe tenerse en consideración que el concepto de niveles jerárquicos es importante aún si no se declaran jerarquías de manera explícita. Por ejemplo, cuando un área de estudio se divide en zonas para efectos analíticos, es importante que sean relativamente homogéneas en términos de su jerarquía. Sería un error dividirla en grandes

distritos y pequeñas zonas simultáneamente, ya que en la calibración no se encontrará un valor de β que sea adecuado para ambos niveles.

El uso de jerarquías tiene también una importancia teórica. Se mencionó que los modelos multinomiales logit tienden a producir errores cuando hay una alta correlación entre los atributos de algunas de las opciones. El modelo multinomial probit no tiene este problema, pero es difícil de aplicar por su complejidad y difícil calibración. Las estructuras jerárquicas permiten soslayar el problema de la correlación entre opciones en los modelos logit. Si en un conjunto de opciones hay un grupo que presenta esta condición de correlación, se les puede agrupar como si fueran una sola opción agregada, y luego, en un segundo nivel jerárquico tratarlas como un conjunto separado de opciones pero condicionadas a la anterior de nivel más alto. Ejemplos de esto se muestran en los Capítulos 6 y 7.

Como consideración final cabe señalar que el modelo de decisiones discretas en su forma de logit multinomial tiene una forma casi idéntica al modelo de maximización de la entropía del Capítulo 3. Esto no es ninguna coincidencia, porque ambas derivaciones llegaron a la misma solución procediendo desde extremos opuestos. El modelo de maximización de la entropía supone que las elecciones discretas son perfectamente aleatorias y luego introduce una restricción racional (costos). Por contraste, la teoría de utilidad aleatoria comienza suponiendo que las decisiones son perfectamente racionales y luego, debido a la agregación, introduce elementos aleatorios.

5 Modelos de contabilidad espacial

En los capítulos precedentes se revisaron las teorías microeconómicas del uso del espacio, seguido por los modelos de interacción espacial y de maximización de la entropía, para terminar con la teoría de utilidad aleatoria y los modelos de decisión discretos. Este capítulo completa el marco teórico general al describir otro desarrollo importante, esta vez proveniente de la macroeconomía: el modelo de insumo producto. Esto introduce una nueva dimensión al problema, cual es el de la producción, que aquí luego relacionaremos con las estructuras urbanas y regionales.

En términos muy generales, la primera generación de los modelos de insumo-producto (input-output (I-O) en inglés) tuvo como objetivo representar la economía de una nación en términos de una contabilidad de producción por sector. Una segunda generación intentó desagregar la contabilidad a nivel de regiones. Una tercera generación más reciente intenta una descripción más completa, incluyendo factores sociales, por lo cual se denominan *modelos de contabilidad social*.

El propósito de este capítulo es derivar un modelo general para representar un sistema espacial-económico a cualquier escala, combinando para ello la estructura del modelo de insumo-producto y capitalizando las enseñanzas de la teoría de utilidad aleatoria. Como en el modelo resultante las variables espaciales están tan fuertemente relacionadas con las de contabilidad económica, se ha adoptado el término de *modelo de contabilidad espacial*.

El punto de partida es una rápida revisión de la teoría de la producción y del multiplicador de Keynes, como punto de partida para otros desarrollos de teorías regionales como la teoría de la renta regional y el estudio de la base económica de una región. Luego se presenta el modelo de insumo-producto en su versión clásica y algunos intentos que se realizaron para su desagregación regional. En este punto la exposición se aleja del flujo principal para derivar el modelo de insumo-producto espacial utilizando los principios de utilidad aleatoria y sus conceptos relacionados de cadenas de decisión, costos variables, elasticidades y jerarquías. El resultado es la propuesta de este autor de un modelo espacial-económico que puede aplicarse a cualquier ciudad o región.

5.1 Teoría de la producción y el multiplicador

Keynes (1936) comienza por introducir el concepto de *demanda efectiva*, según el cual el proceso de producción está determinado principalmente por el consumo. De acuerdo con este principio, los productores determinan el nivel de su actividad de acuerdo a los niveles de demanda que estiman para el futuro. La demanda, a su vez, no es una función del precio, como en la economía clásica, sino que depende de los ingresos, que a su vez depende de la inversión. Formalmente:

$$P\{C[Y(I)]\} \quad (5-1)$$

donde P es la producción, C es la demanda futura o consumo, Y representa el ingreso, e I es la inversión.

En el sistema económico en su conjunto se distingue entre dos actores principales: productores y consumidores. Los productores pueden producir o invertir para producir más a futuro. Los consumidores pueden consumir o ahorrar para consumos futuros. Como puede verse en la Figura 5-1 los productores pagan a los consumidores en términos de salarios, ganancias, etc. y a su vez, los consumidores pagan a los productores en términos de consumo.

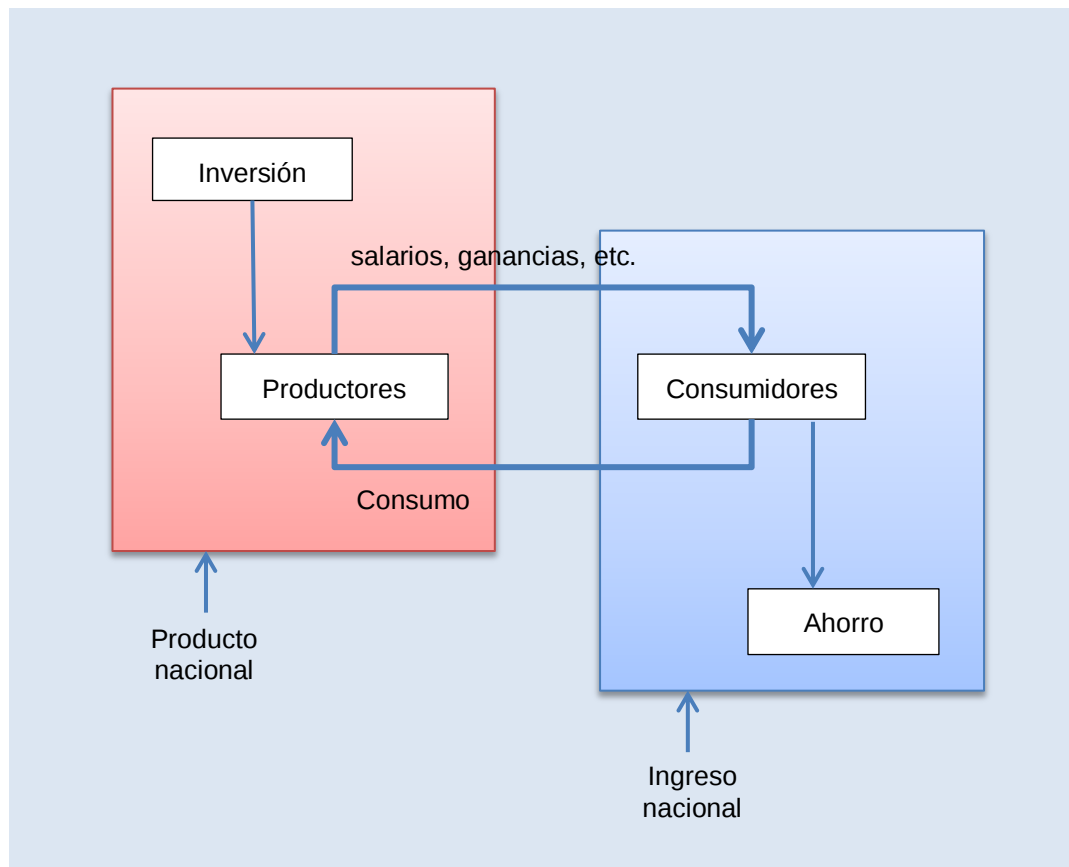
El Producto Nacional se define como la suma de todos los bienes producidos más la inversión. El Ingreso Nacional se define como la suma del consumo más el ahorro. Dado que se supone que el sistema está cerrado, se puede establecer una condición para el equilibrio general:

$$Y = P \quad (5-2)$$

Como por definición $Y = C + S$ y $P = C + I$, se deduce que el equilibrio general puede reformularse como:

$$S = I \quad (5-3)$$

es decir, en equilibrio el ahorro debe ser igual a la inversión. Si los consumidores deciden ahorrar una proporción mayor del ingreso, consumirán menos, y por lo tanto los productores también reducirán la producción. Esto a su vez, reducirá el ingreso de los consumidores vía salarios y ganancias, de tal manera que les resultará más difícil ahorrar.

Figura 5-1: El sistema económico general en el modelo de Keynes

Desde el punto de vista de los consumidores, la proporción del ingreso que están dispuestos a gastar se llama *propensión al consumo*, que se representa gráficamente en las curvas de consumo y ahorro de la Figura 5-2. En la Figura 5-2(a) la curva CC representa la propensión al consumo, y SS en la Figura 5-2(b) es la *propensión al ahorro*. El punto B es el umbral mínimo por debajo del cual no puede haber ahorro y todo el ingreso se destina a consumo. De allí en adelante, a medida que el ingreso aumenta, una cierta proporción creciente del ingreso se destina a ahorro, hasta que llega a una cantidad dada de inversión representada por la recta horizontal II (la inversión no depende del ingreso). Cuando la curva SS intersecta II en el punto E, quiere decir que el ahorro es igual a la inversión, y por lo tanto se ha llegado al equilibrio como se estableció en la ecuación (5-3).

Si por alguna razón hay un incremento en el ahorro, la curva SS se moverá hacia arriba y el punto E se moverá hacia la izquierda, lo cual hará que el ingreso en equilibrio Y_E decrezca. Si, por otra parte la inversión aumenta (porque los productores tienen confianza en la prospectiva económica, o por intervención del estado) el punto E se moverá a la derecha como el punto E' en la figura Figura 5-2(b), con lo cual se puede lograr un ingreso más alto. Si la inversión aumenta, también lo hará el ingreso pero en una mayor proporción, lo cual se debe al efecto *multiplicador*, un elemento clave en

la teoría de Keynes. El multiplicador, k , representa el efecto que una unidad de incremento en la inversión genera sobre el ingreso, esto es:

$$Y = kI \quad (5-4)$$

o

$$Y = \frac{dY}{dI} \quad (5-5)$$

De (5-2) y (5-3) y dado que $C = C(Y)$:

$$I = Y - C(Y) \quad (5-6)$$

Diferenciando respecto a I y arreglando los términos:

$$\frac{dY}{dI} = \frac{1}{1 - dC/dY} \quad (5-7)$$

Como puede deducirse de la Figura 5-2(b) dC/dY es la propensión marginal al consumo, c , y similarmente, dS/dY es la propensión marginal al ahorro. Dado que según la ecuación (5-5) $\frac{dY}{dI} = k$, la ecuación (5-7) puede reducirse a:

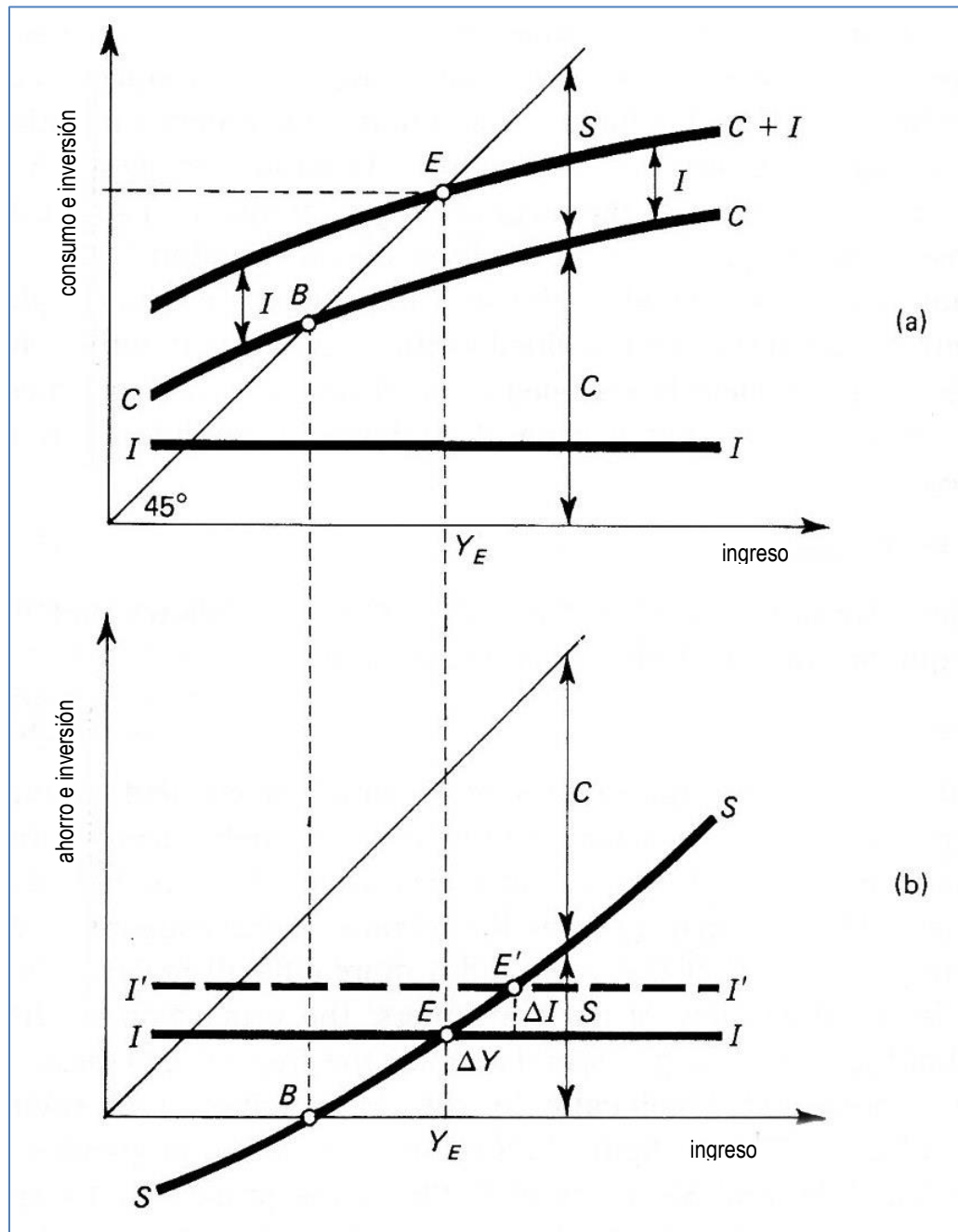
$$k = \frac{1}{1 - c} \quad (5-8)$$

Dado que $C = Y - S$ la ecuación (5-8) puede re-escribirse como:

$$k = \frac{1}{1 - (1 - \frac{dS}{dY})} = \frac{1}{\frac{dS}{dY}} = \frac{1}{s} \quad (5-9)$$

El efecto multiplicador puede verse gráficamente en la Figura 5-2(b). Si la inversión crece por alguna razón externa y pasa de I a I' , ΔY representa el incremento en el ingreso como resultado del incremento en la inversión ΔI . Como SS tiende a estar por debajo de la línea de 45° ΔY tenderá a ser mayor que ΔI , lo cual representa una ganancia neta en el sistema.

Figura 5-2: Curvas de consumo y ahorro en el modelo de Keynes



La teoría de Keynes es un poderoso argumento en favor del gasto deficitario a través de inversión pública, y políticas fiscales para incrementar el consumo y la inversión. Como tal ha tenido un profundo impacto social, económico y político. Desde un punto de vista teórico, es la base para muchos desarrollos posteriores, algunos de los cuales serán presentados en las próximas secciones.

5.2 Teoría del ingreso regional y el método de la base económica

El modelo de Keynes fue diseñado para aplicarse a la escala nacional. El *modelo del ingreso regional* (RI) toma muchísimo del modelo de Keynes, pero está diseñado para ser aplicado a una región dentro de una nación, y consecuentemente logra una mayor desagregación al representar explícitamente factores externos como importaciones y exportaciones, y al distinguir entre los sectores público y privado. El modelo de Keynes supone un sistema cerrado, mientras el modelo RI representa a una región dentro de un contexto más amplio. En este caso el comercio con otras regiones, especialmente las exportaciones, aparecen como la principal palanca del desarrollo, en lugar de las inversiones como en el modelo de Keynes.

El modelo RI comienza con las siguientes relaciones:

$$Y = P = C + I + G + X - M \quad (5-10)$$

donde C es el consumo privado, I es la inversión, G es el consumo del gobierno, X son las exportaciones y M son las importaciones. El consumo, la inversión y las importaciones dependen del ingreso de la región, mientras las exportaciones dependen del ingreso de otras regiones, y por lo tanto es exógeno al modelo.

La Figura 5-3 presenta las principales relaciones entre estas variables. La curva E es el resultado de sumar el consumo privado, inversión y consumo del gobierno, y por lo tanto crece con el ingreso. La curva E' representa toda la demanda agregada en la región: $E' = E + X - M$. Las exportaciones se suponen constantes, ya que no dependen del ingreso. Como $Y = P$, el equilibrio se encuentra en el punto Q donde $Y = E'$.

Supongamos ahora que se puede lograr un incremento en las exportaciones, de X a X' (ΔX), lo cual genera una nueva demanda agregada representada por E'' . El punto de equilibrio se moverá de Q a T , y debido al efecto multiplicador ΔY tenderá a ser mayor que ΔX . En este modelo la magnitud del efecto multiplicador dependerá de la propensión marginal a importar y la propensión marginal a consumir.

El nivel de E puede considerarse función del ingreso:

$$E = a + bY \quad (5-11)$$

donde a es una constante igual al nivel de E cuando Y es cero (punto a en la Figura 5-3), y donde b es la propensión marginal al consumo:

$$b = dE/dY \quad (5-12)$$

Por otra parte las importaciones también son una función del ingreso:

$$M = f + gY \quad (5-13)$$

donde f es una constante igual al nivel de importaciones cuando Y es cero (punto f en la figura), y donde g es la propensión marginal a importar:

$$g = dM/dY \quad (5-14)$$

Si $Y = E + X - M$ y reemplazando E y M de (5-11) y (5-13):

$$Y = a + bY + X - f - gY \quad (5-15)$$

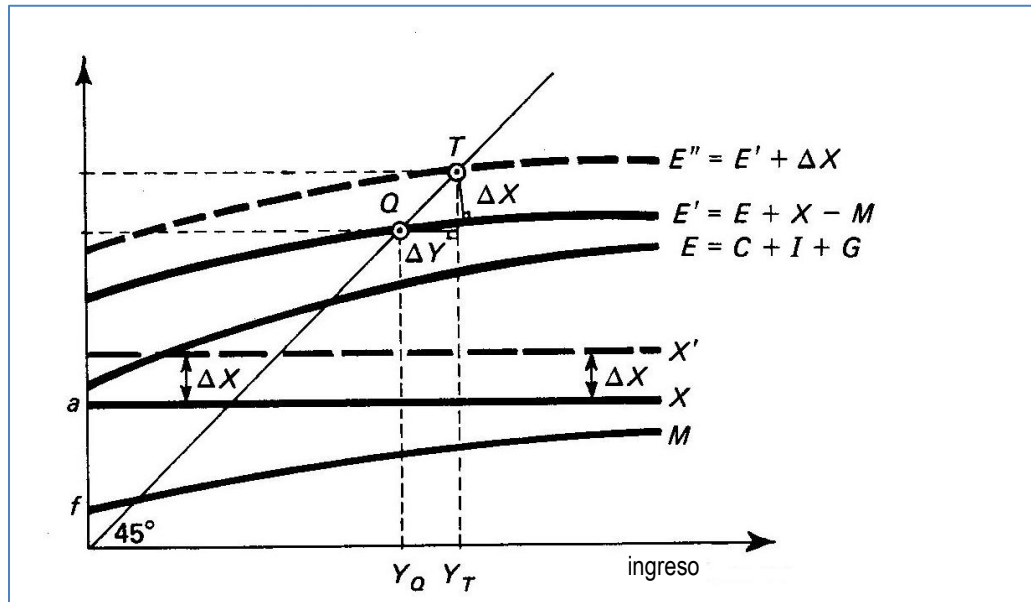
de donde:

$$Y = \frac{X + a - f}{1 - (b - g)} \quad (5-16)$$

$$\frac{dY}{dX} = \frac{1}{1 - (b - g)} \quad (5-17)$$

Como puede verse, en este modelo el multiplicador es función de la diferencia entre la propensión marginal a consumir y a importar, mientras Keynes consideró sólo el primero.

Figura 5-3: Relaciones básicas en el modelo de ingreso regional (RI)



Aunque se supone que el modelo RI es operacional, en la práctica es difícil de aplicar por el hecho que la data no está disponible generalmente. Esto llevó a desarrollar el método de la *base económica* de una región, que es un enfoque más pragmático y utiliza información disponible.

El principal supuesto de este método es, similar al modelo RI, que el ingreso de una región depende de las actividades productivas que pueden exportar bienes y servicios a otras regiones. La clave de este método es distinguir cuáles son los sectores principalmente exportadores de una región, llamados *sectores básicos*, y las actividades no orientadas a la exportación sino al consumo interno, o sectores *no-básicos*. Se han propuesto varios métodos para hacer esta distinción (ver, por ejemplo, Isard, 1960).

Una vez se ha clasificado la producción en sectores básicos y no-básicos, se introduce una simplificación adicional: el ingreso regional será proporcional a la producción de

los sectores básicos. También se supone que la propensión marginal al consumo es igual para todas las regiones. Con estos supuestos, el multiplicador puede estimarse como:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{1}{1 - \left(\frac{E^s}{E^t}\right)} \quad (5-18)$$

donde E^s es el empleo no-básico y E^t es el empleo total. Dado que E^t es la suma del empleo básico más el no-básico ($E^t = E^b + E^s$), entonces:

$$\frac{dY}{dX} = \frac{E^t}{E^b} \quad (5-19)$$

5.3 El modelo input-output

5.3.1 El modelo input-output de región única

El modelo input-output introducido por Leontief (1941) representa un esfuerzo importante para desagregar el modelo de Keynes y el modelo RI, al proveer una contabilidad detallada del efecto multiplicador. Permite construir un marco contable detallado para la representación de un sistema económico. La propuesta original fue desarrollada para una sola región, es decir, es un modelo a-espacial.

Los principales componentes de una tabla input-output de región única se muestran en la Figura 5-4. La tabla hace una primera distinción entre los inputs como orígenes de los *sectores de producción*, y los outputs o *sectores de demanda*. A su vez, los inputs están divididos en *inputs producidos* e *inputs primarios*, y los sectores de demanda están divididos en *demanda intermedia* y *demanda final*.

La demanda intermedia puede representarse como una matriz $\mathbf{x}$ en la que cada componente x^{mn} representa la cantidad de producción de m requerido para producir n . La demanda final representa el uso final que se le da a la producción, distinguiendo generalmente entre sus diversos componentes: I = inversión, C = consumo privado, G = consumo del gobierno, y E = exportaciones.

Los inputs producidos corresponden a los orígenes de la matriz $\mathbf{x}$, y representa los inputs que son producidos dentro del sistema. Lo que no fue producido dentro del sistema se denomina como inputs primarios e incluye el valor agregado (remuneración al capital, remuneración al trabajo e impuestos), y las importaciones.

Figura 5-4: Elementos básicos del modelo de input-output de región única

Destinos (outputs) Orígenes (inputs)		Sectores de demanda						Demanda Final Y^{mn}					Prod Total X^m	
		Demanda intermedia x^{mn}						Total W^m	I^m	C^m	G^m	E^m		Total Y^m
		Sectores												
1	2	...	n	...	z									
Inputs producidos	1	x^{11}	x^{12}		x^{1n}		x^{1z}	W^1	I^1	C^1	G^1	E^1	Y^1	X^1
	2	x^{21}	x^{22}		x^{2n}		x^{2z}	W^2	I^2	C^2	G^2	E^2	Y^2	X^2
	...													
	m	x^{m1}	x^{m2}		x^{mn}		x^{mz}	W^m	I^m	C^m	G^m	E^m	Y^m	X^m
	z	x^{z1}	x^{z2}		x^{zn}		x^{zz}	W^z	I^z	C^z	G^z	E^z	Y^z	X^z
	Total U^n	U^1	U^2		U^n		U^z							
Inputs primarios V^n		V^1	V^2		V^n		V^z		V^I	V^C	V^G	V^E	V^Y	V
Producción Total X^n		X^1	X^2		X^n		X^z		I	C	G	E	Y	X

Se pueden establecer una serie de relaciones formales entre estos componentes. En primer lugar la producción en cada sector, X^m , debe ser igual a la suma de todas las demandas intermedias más los componentes de la demanda final:

$$X^m = \sum_n x^{mn} + I^m + C^m + G^m + E^m \quad (5-20)$$

En segundo lugar si W^m es la suma de la demanda intermedia ($W^m = \sum_n x^{mn}$) y Y^m es la demanda final ($Y^m = I^m + C^m + G^m + E^m$) entonces:

$$X^m = W^m + Y^m \quad (5-21)$$

En tercer lugar, si se supone que toda la producción es igual a la demanda total, la producción total de cada sector también debe ser igual a la suma de todos los inputs producidos, U^n más los inputs primarios:

$$X^n = \sum_m x^{mn} + V^n \quad (5-22)$$

Finalmente se introduce un supuesto simplificativo: hay una relación lineal entre la producción de cada sector y la cantidad de producción que requiere de otros sectores, esto es:

$$x^{mn} = a^{mn} X^n \quad (5-23)$$

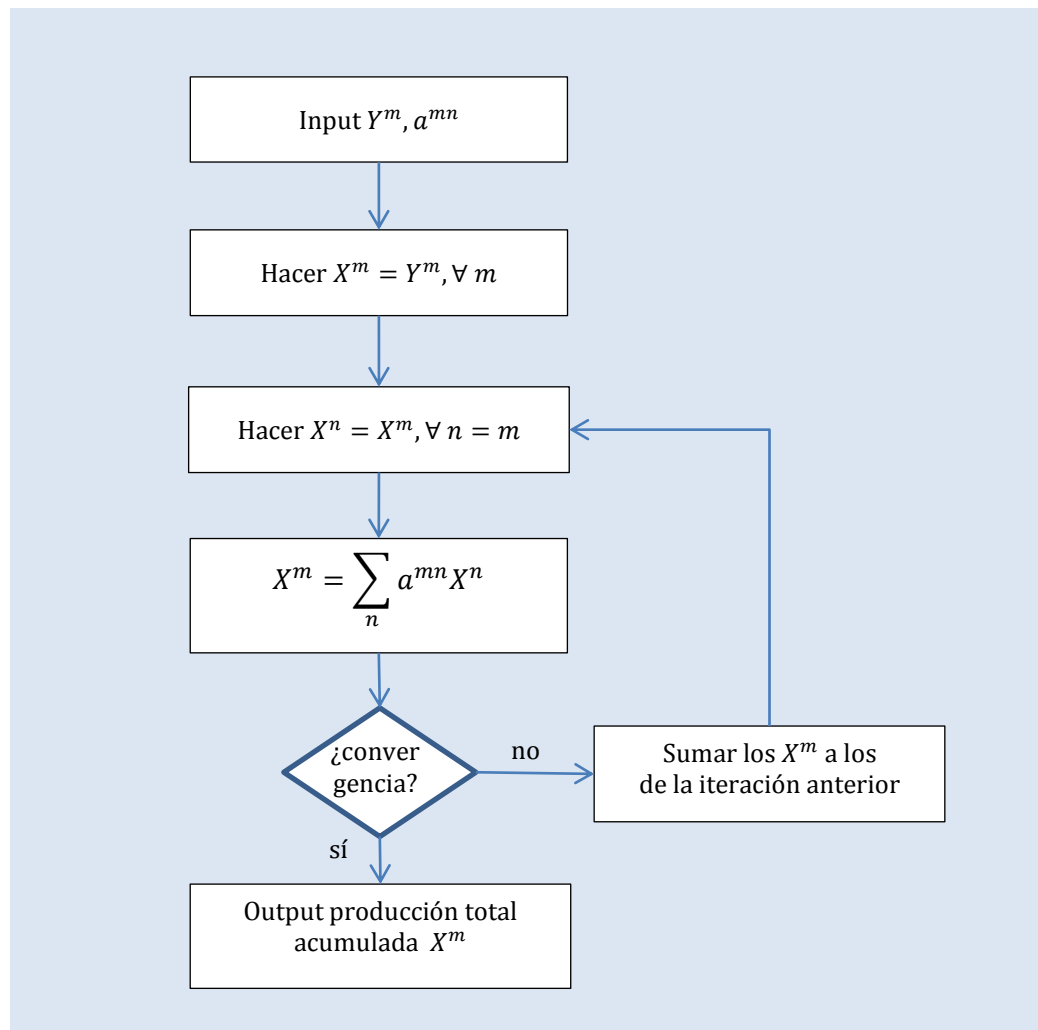
donde a^{mn} es una matriz de constantes denominada *coeficientes técnicos*, que representan la cantidad de producción del sector m que se requiere para producir una unidad de producto del sector n . En consecuencia:

$$a^{mn} = \frac{x^{mn}}{X^n} \quad (5-24)$$

La matriz de coeficientes técnicos se supone estable en el corto plazo, pero podría cambiar en el futuro como consecuencia de cambios en la tecnología de producción. En consecuencia, se le toma como dato exógeno al modelo. Se supone que no hay economías de escala en estos coeficientes. La ecuación (5-21) puede ser reformulada como:

$$X^m = \sum_n a^{mn} Y^m \quad (5-25)$$

Esta es la forma final del modelo input-output, que representa un conjunto de ecuaciones simultáneas en X^m que puede resolverse para un conjunto de vectores de demanda final Y^m y matriz de coeficientes técnicos a^{mn} . El resultado será X^m que es la cantidad de producción por sector requerida para satisfacer la demanda. Luego, esta producción representa una nueva demanda que deberá ser satisfecha por producción adicional, lo cual genera un nuevo conjunto de ecuaciones (5-25). La secuencia procede de forma iterativa hasta lograr un nivel de convergencia aceptable, como puede verse en la Figura 5-5.

Figura 5-5: Algoritmo para resolver el modelo input-output con región única

Una alternativa a la solución iterativa puede lograrse por álgebra matricial, que es la que aparece en la mayoría de los textos, de la siguiente forma:

$$X = (I - a)^{-1}Y \quad (5-26)$$

donde (en este caso) I es la matriz unitaria. Esto efectivamente evita las iteraciones y genera una solución directa. Sin embargo es fácil demostrar que la solución iterativa es mucho más eficiente que la inversión de la matriz, un hecho que recuerda las ventajas de las soluciones algorítmicas discutidas en la sección 3.5. Más aún, el algoritmo iterativo converge en todos los casos, mientras el método matricial no necesariamente lo hace.

5.3.2 El modelo input-output multiregional

El problema más importante cuando intentamos aplicar el modelo input-output a un sistema económico con múltiples regiones es la manera como representamos las in-

teracciones espaciales que ocurren entre las regiones. El problema no es trivial, y no se trata simplemente de agregar índices i y j a las ecuaciones para que las múltiples regiones queden incorporadas. Si hacemos esto, la relación principal de la contabilidad (5-25) se transformará en:

$$X_i^m = \sum_n a^{mn} \sum_j x_{ij}^n + Y_i^m \quad (5-27)$$

donde x_{ij}^n es el flujo de mercancías n desde la región i a la región j . Por lo tanto, $\sum_j x_{ij}^n$ representa la cantidad total de n producida en la región i . La ecuación (5-27) no es suficiente para resolver el sistema multiregional, ya que hay una ecuación para cada región y sector ($i \times m$ ecuaciones), pero debido a x_{ij}^n hay mucho más incógnitas ($i^2 \times m$). Lo que hace falta, por lo tanto, es un conjunto de ecuaciones en x_{ij}^n que relacionen las regiones i con las j .

Leontief y Strout (1963) resolvieron este problema suponiendo que todos los bienes producidos en la región i van a un *pool de oferta*, y que todas las mercancías que son consumidas en la región provienen de un *pool de demanda*. Los autores luego introducen un conjunto de ecuaciones del siguiente tipo:

$$x_{ij}^n = \frac{\sum_j x_{ij}^n \sum_i x_{ij}^n}{\sum_{ij} x_{ij}^n} Q_{ij}^n \quad (5-28)$$

donde Q_{ij}^n es algún tipo de función de la distancia a ser estimada de la data del año base.

La Figura 5-6 muestra las principales relaciones en este sistema. Un flujo cualquiera x_{ij}^n representa el movimiento de la mercancía n desde la región de producción i al pool de oferta. El pool de oferta de la región i , junto con la contribución de todas las otras regiones forman el pool de demanda para la región i , desde donde la producción fluye de vuelta a cualquier sector de la región i (demanda final, otros sectores o el mismo sector).

Tomando esto como punto de partida, Wilson (1970) intenta una integración entre la propuesta de Leontief-Strout y los modelos de interacción espacial, utilizando el método de la maximización de la entropía, e introduciendo las restricciones apropiadas. Wilson explora cuatro tipos de modelos desde el libre de restricciones hasta el doblemente restringido, y luego introduce un modelo híbrido para distintos tipos de mercancías.

Está claro que distintos tipos de mercancías caen en diferentes categorías. Por ejemplo, una mercancía del sector primario como carbón es probablemente restringida en la producción; una mercancía que es principalmente intermedia para sectores primarios será restringida en el destino; una mercancía primaria que es input para otra mercancía primaria será doblemente restringida; y habrá una amplia gama de mercancías que no estarán restringidas ni en la producción ni en la demanda.

5.3.3 Consideración finales acerca de los modelos input-output

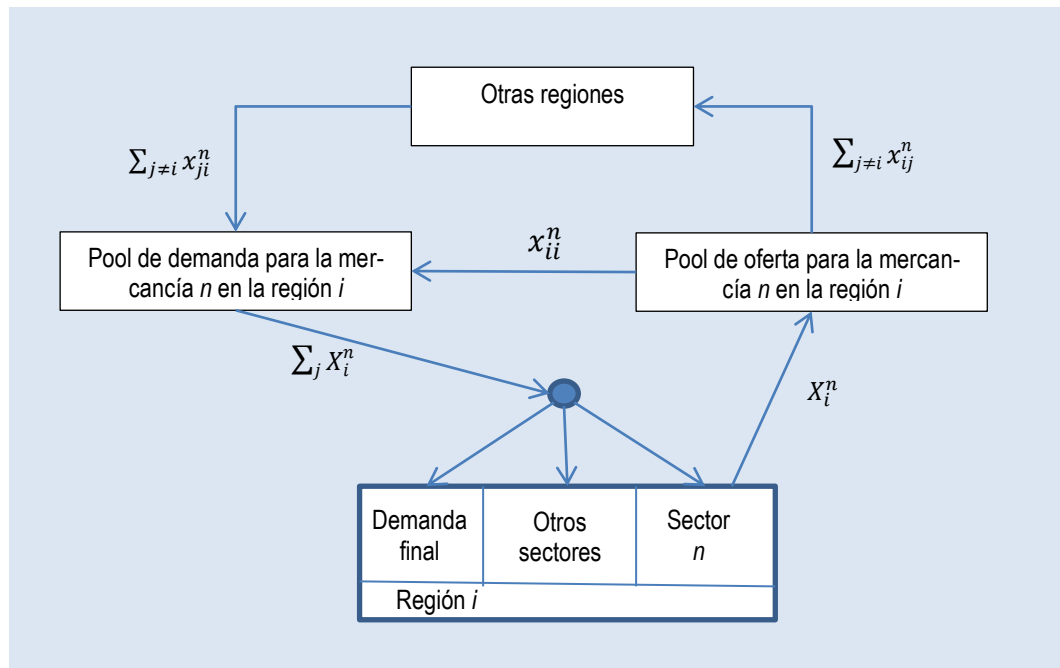
El modelo input-output de región única es una manera muy poderosa de representar un sistema económico, y como tal se ha transformado en la herramienta *de facto* en la planificación macroeconómica de naciones. A esta escala la información necesaria para calibrar el modelo está ampliamente disponible.

Dos consideraciones impulsan la necesidad de desagregar el modelo por regiones. Por una parte permite a los analistas el evaluar los efectos de políticas a un nivel regional. Por ejemplo, los analistas pueden estimar el efecto en cada región de un incremento de la demanda de acero en alguna región específica. Por otra parte, es bastante claro que la forma en que se organiza la producción en la estructura regional tiene un importante efecto en la economía en su conjunto. En consecuencia, un modelo que hace referencia explícita a la distribución de la producción en las distintas regiones es una mejor representación del sistema económico que uno que no lo hace, aún si el análisis es a nivel nacional.

A pesar que muchos países recaban la información necesaria para la contabilidad multiregional, el proceso de recolección es costoso, y tiende a producir resultados poco confiables. Más aún, el esquema de los pools de demanda y oferta es engorroso desde un punto de vista teórico. La proposición de Wilson mantiene esta estructura, y aún si aportó ideas interesantes, el modelo resultante es muy complicado y nunca ha sido utilizado en la práctica.

Lo que se requiere, entonces, es un modelo general basado en un marco teórico más consistente y que facilite la implantación. En la próxima sección se presenta y discute una proposición que aprovecha las ventajas de la teoría de utilidad aleatoria para derivar el modelo general deseado.

Figura 5-6: Flujos de mercancías en el modelo insumo-producto multiregional de Leontief

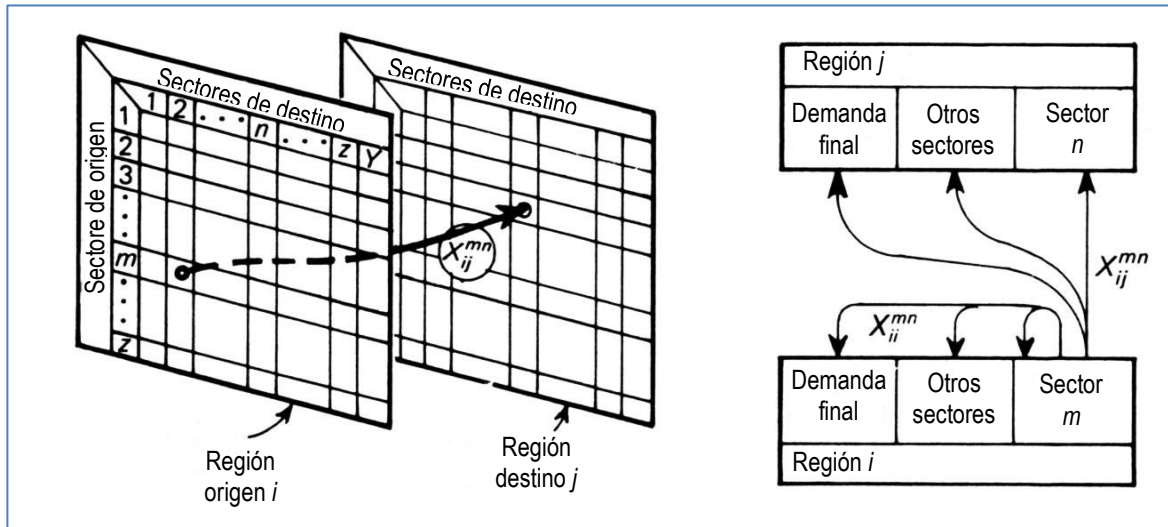


5.4 Un modelo de insumo-producto multiregional basado en teoría de utilidad aleatoria

5.4.1 El modelo general

Esta propuesta se distancia de las anteriores en que, en lugar de representar los flujos en términos de X_i^n se considera como objeto principal de modelación una matriz x_{ij}^{mn} en la cual la producción fluye directamente desde sectores y regiones de origen a sectores y regiones de destino. Este esquema se presenta en la Figura 5-7, donde también se ha incluido un esquema que mímica el equivalente de la Figura 5-6.

Figura 5-7: Flujos de producción multiregional y multisectorial



En cada región i y sector m hay una cantidad dada de demanda final, Y_i^m , que debe ser satisfecha por los productores. Potencialmente todos los productores de todas las regiones y sectores pueden satisfacer esta demanda. La cantidad de producción del sector n que se requiere para satisfacer la demanda del sector m en la región i puede calcularse multiplicando Y_i^m por los coeficientes a^{mn} respectivos.

Las actividades de demanda están interesadas en adquirir los bienes $Y_i^m a^{mn}$ al mejor precio posible, independientemente de dónde provengan esos bienes. Para los productores, los factores que influyen en el precio al cual pueden ofrecer la producción son el costo de producción y el costo de transportar estos bienes al lugar donde son demandados. La diferencia entre el costo de producción + transporte y el precio de las mercancías en una región en particular es el excedente a los productores, que ellos intentan maximizar.

En estos términos, cada unidad de demanda asignará sus compras al productor que pueda abastecer al precio más bajo. En otras palabras, cada unidad de demanda ordenará las opciones de oferta en términos del precio que ofrecen, y asignarán todas sus compras al oferente vencedor. La transacción será:

$$X_{ij}^{mn} = Y_i^m a^{mn} \min(K_j^n + c_{ij}^n + e_j^n) \quad (5-29)$$

donde X_{ij}^{mn} representa la cantidad de producción de n ubicado en la región j que compra una unidad de demanda del sector m en la región i (i y j pueden estar en la misma región). K_j^n es el costo de producir n en j , c_{ij}^n es el costo de transportarlo a i , y e_j^n es el excedente del productor de n en j . La función del mínimo debe ser evaluada sobre todas las n en las diversas regiones donde se produce. Nótese que el excedente del productor victorioso no puede superar la diferencia entre sus propios costos y el costo del productor que le sigue en la lista.

De acuerdo con la expresión (5-29), la unidad de demanda comprará todos sus requerimientos de n al productor victorioso, y nada a los demás. Efectivamente sería el caso entre un demandante individual y un productor individual cuando están transando una mercancía muy específica. A su vez, el productor requerirá insumos, y los comprará adoptando un criterio similar. Esto generará un segundo eslabón en lo que terminará siendo una larga *cadena de decisiones*. Los eslabones se multiplicarán y desplegarán como ramas de un árbol. Cada rama terminará cuando la cantidad de producción asignada sea despreciable, cuando encuentra un input primario o cuando la compra vaya a un productor fuera del sistema (importaciones).

Sin embargo, y como se discutió en el capítulo precedente, el caso individual descrito tiene muy poco valor práctico. Las unidades tanto de demanda como de oferta deben ser agregadas en sectores, y sus localizaciones puntuales deben agruparse en regiones o zonas. El proceso de agregación, como se argumentó, introduce fuentes de variabilidad al sistema, tal que las funciones de decisión deben incluir componentes aleatorios. Esto, como se recordará, lleva a un modelo multinomial logit. Si la suma $K_j^n + c_{ij}^n + e_j^n$ se denota como V_{ij}^n , entonces la distribución de las compras del sector n en i será:

$$x_{ij}^{mn}(1) = Y_i^m a^{mn} \frac{\exp(-\beta^n V_{ij}^n)}{\sum_j \exp(-\beta^n V_{ij}^n)} \quad (5-30)$$

donde $x_{ij}^{mn}(1)$ representa la cantidad de producción del sector n compradas en j por la demanda final del sector m localizado en la región i en el primer enlace de la cadena de producción. Una vez esta ecuación es aplicada a todos los sectores y regiones de demanda final, es posible calcular cuánto se compró en cada sector y región:

$${}^1X_j^n = \sum_{im} {}^1x_{ij}^{mn} \quad (5-31)$$

A su vez, para producir esta primera cantidad en cada sector y región, los sectores de producción se deben transformar en sectores de demanda, generando más transacciones:

$${}^2x_{ij}^{mn} = {}^1X_i^m a^{mn} \frac{\exp(-\beta^n V_{ij}^n)}{\sum_j \exp(-\beta^n V_{ij}^n)} \quad (5-32)$$

con lo cual la producción en cada región y sector en esta segunda iteración será:

$${}^2X_j^n = \sum_{im} {}^2x_{ij}^{mn} \quad (5-33)$$

Para un eslabón genérico r :

$${}^r x_{ij}^{mn} = {}^{r-1} X_i^m a^{mn} \frac{\exp(-\beta^n V_{ij}^n)}{\sum_j \exp(-\beta^n V_{ij}^n)} \quad (5-34)$$

y

$${}^r X_j^n = \sum_{im} {}^r x_{ij}^{mn} \quad (5-35)$$

La cantidad total producida en una región y sector, luego de la convergencia, será:

$$^*X_j^n = Y_j^n + {}^1X_j^n + {}^2X_j^n + \dots \quad (5-36)$$

o

$$^*X_j^n = Y_j^n + \sum_r {}^rX_j^n \quad (5-37)$$

Si el sistema es racional y las transacciones están expresadas en su valor monetario, una condición necesaria es:

$${}^1X_j^n > {}^2X_j^n + \dots \quad (5-38)$$

esto es, ${}^rX_j^n$ tiende a cero cuando r tiende a infinito.

5.4.2 Acumulación de precios en la cadena de producción: precios normales

Siguiendo la cadena de decisiones desde 1 hasta R , siendo R el último eslabón, las compras se distribuyen entre los productores. Las mercancías se mueven físicamente desde los lugares de producción a los lugares de consumo, y los pagos fluyen en sentido contrario. Si se sigue la cadena desde R hasta 1, donde 1 representa la demanda final, pueden acumularse los precios: un sector de producción le cobrará a un sector de consumo una cantidad igual a su propio costo de producción, más transporte, más el valor agregado (ganancias, etc.) El sector de consumo, a su vez, compra sus insumos de diversos sectores y regiones, y les agrega sus propios costos de producción y valor agregado. Como se trata de sectores agregados, es difícil tener una estimación detallada de las ganancias de los productores y otros componentes del valor agregado, de tal manera que deberemos adoptar un promedio para cada sector que denominamos como *ganancias normales*.

Se supone que en el eslabón R ya no hay más costos de transporte, tal que los precios son igual a la producción más el valor agregado:

$${}^R P_j^n = K_j^n + e_j^n \quad (5-39)$$

Donde ${}^R P_j^n$ es el precio por unidad de mercancía que pagan los consumidores del sector n en la región j en el eslabón R . En el eslabón $R-1$ los consumidores compran a varios sectores y regiones, y por lo tanto podemos computar un promedio:

$${}^{R-1} P_i^m = \frac{\sum_{jn} {}^{R-1} x_{ij}^{mn} ({}^R P_j^n + c_{ij}^n + e_j^n)}{{}^{R-1} X_i^m} \quad (5-40)$$

En otras palabras, el precio promedio de la mercancía m que paga un sector de consumo del sector n en i será igual a la cantidad comprada multiplicada por los componentes del precio en cada caso, y dividido por la cantidad total de las mercancías producidas en el sector de demanda, ${}^{R-1} X_i^m$. Similarmente, en cualquier eslabón intermedio r , el precio unitario será:

$$rP_i^m = \frac{\sum_{jn} r x_{ij}^{mn} ({}^{R+1}P_j^n + c_{ij}^n + e_j^n)}{rX_i^m} \quad (5-41)$$

y así sucesivamente hasta que se alcanza el primer eslabón, donde:

$${}^1P_j^n = \sum_{jn} {}^1x_{ij}^{mn} ({}^2P_j^n + c_{ij}^n + e_j^n) / Y_i^m \quad (5-42)$$

El modelo input-output multiregional descrito debe ser resuelto iterativamente. Se debe comenzar por una estimación inicial de precios, y sobre esta base se calculan las distribuciones *aguas abajo* desde el eslabón 1 hasta el R (determinado por la convergencia). Los precios se calculan *aguas arriba* utilizando las ecuaciones (5-40) y (5-41), comenzando por el eslabón R hasta que se alcanza el eslabón 1. El procedimiento se repite varias veces hasta que se logra la convergencia de los precios. Nótese que el modelo debe trabajar con dos indicadores de convergencia: uno para la producción y uno para los precios.

Alternativa o complementariamente, se puede usar la ecuación (4-11) para calcular un promedio de utilidad percibida, que en este caso es:

$$r\tilde{P}_j^{mn} = \frac{1}{-\beta^n} \ln \left[\sum_j \exp(-\beta^n r^{-1} p_j^n + c_{ij}^n + e_j^n) \right] \quad (5-43)$$

donde $r\tilde{P}_j^{mn}$ es el costo compuesto percibido por m cuando compra de los sectores n para producir una unidad de su mercancía. Como m también requiere producción de todos los sectores, el costo compuesto percibido para todos los inputs del sector m en la región i será:

$$r\tilde{P}_j^{m*} = \sum_n a^{mn} r\tilde{P}_i^{mn} \quad (5-44)$$

Esta forma de calcular los precios no sólo es consistente con la teoría de utilidad aleatoria, sino también es más fácil de calcular. El procedimiento comienza desde el eslabón R hacia arriba, porque para aplicar las ecuaciones (5-43) y (5-44) no se necesita saber cómo se van a distribuir las compras. Una vez llegados al eslabón 1, la secuencia de cálculo se revierte para calcular la distribución de las compras hasta llegar al último eslabón donde el proceso se detiene sin que se requieran más iteraciones.

Como puede verse, el primer enfoque trabaja sobre la base de precios estrictos que de hecho se pagan en el sistema, representando así transacciones reales. El segundo enfoque trabaja sobre la base de costos percibidos, y por lo tanto está sujeto a interpretación. Esta interpretación es muy similar a la que se describió en el Capítulo 4 cuando se presentó la teoría de utilidad aleatoria. Es materia de debate si los costos reales o los percibidos deben aplicarse a los sectores productivos. Los dos enfoques pueden combinarse: se puede utilizar costos compuestos percibidos para la distribución de los consumos a los sectores de producción, y simultáneamente calcular los precios reales para coincidir con la contabilidad económica.

5.4.3 Acumulación de precios en la cadena de producción: precios de equilibrio

En el modelo descrito en la sección anterior se supuso que en cada eslabón a lo largo de la cadena se extraen ganancias normales. Sin embargo, hay circunstancias en las que esas ganancias pueden alterarse generando ganancias anómalas, que pueden ser mayores que las normales, caso en el que se les puede denominar como *rentas*.

La magnitud de las ganancias normales está determinada por las relaciones sociales y económicas que prevalecen en el sistema económico. Estas relaciones están gobernadas por el sistema político que determina qué proporción del valor agregado puede ser apropiado por el capital. En la formulación anterior, e^n representa la remuneración al capital como un promedio por sector determinado por el sistema socio-político.

Las ganancias anómalas o rentas pueden surgir en diversas y especiales circunstancias. Las dos condiciones más importantes que dan surgimiento a este tipo de anomalías son: escasez y monopolio, generando *renta de escasez* y *renta monopólica* respectivamente.

La renta de escasez surge cuando la oferta de una determinada mercancía en una o más regiones no puede crecer al mismo ritmo que la demanda. Ejemplos típicos son materias primas o recursos naturales no renovables. En un área urbana el ejemplo más típico es el suelo. Frecuentemente puede ocurrir que las restricciones a la oferta son a corto plazo, que se puede resolver en el largo plazo a través de inversiones. Puede ocurrir que en alguna región de rápido crecimiento la mano de obra se convierta en una restricción al corto plazo, para ser resuelta en el largo plazo con migraciones.

Las rentas monopólicas surgen cuando un único productor tiene total control sobre la oferta y determina la cantidad a producir. Si es un monopolio privado, la intención es limitar la oferta para maximizar las ganancias. Esto último, a su vez, es función de la escala de la producción (determina costos) y la elasticidad de la demanda (determina la cantidad a consumir). Estas dos variables producirán un punto óptimo donde las ganancias son las mayores posibles. Si el monopolio es público, se entiende que los precios son tales que maximicen los beneficios sociales totales.

Consecuentemente, la renta de escasez y la renta monopólica pueden considerarse como equivalentes desde el punto de vista analítico. Si la oferta está restringida en el corto plazo, los precios pueden estar por encima o por debajo de los precios normales. Se puede decir que el modelo presentado en la sección precedente debe suponer que, eventualmente, cualquier sector en cualquier región puede presentar escasez. Dos conclusiones se pueden derivar de este punto:

- Las rentas anómalas pueden ser diferentes de una región a otra, dependiendo de las relaciones específicas entre oferta y demanda y los precios de transporte.
- Las rentas anómalas pueden ser diferentes de un período de tiempo a otro.

Trataremos estos asuntos uno a la vez. Para comenzar, es necesario introducir una nueva variable al sistema: Q_j^n , la capacidad instalada de producción del sector n en cada región j . Luego, la secuencia de cálculo debe ser modificada de la siguiente manera:

- Calcular los costos compuestos en la cadena desde abajo hacia arriba, utilizando las ecuaciones (5-43) y (5-44), suponiendo beneficios normales e_j^n .
- Asignar las compras de los sectores y regiones de demanda a las de producción utilizando las ecuaciones (5-34) y (5-35).
- Comparar la producción asignada a cada sector y región con las restricciones dadas Q_j^n . Si la producción asignada es mayor que la capacidad de producción, incrementar los beneficios e_j^n . En caso contrario, reducirlos.
- Volver al paso a) para recalcular los costos compuestos, y proceder iterativamente hasta lograr que toda la producción asignada es igual a las restricciones dadas para todas las regiones y sectores.

Esto resuelve el problema de las ganancias anómalas en el corto plazo, donde la capacidad instalada Q_j^n se supone fija. Como resultado el modelo producirá factores de ganancia diferentes para todos los sectores y regiones, lo cual puede explicar las muchas diferencias entre regiones, además de los costos de transporte.

En el largo plazo, los valores de Q_j^n también se les debe poder variar. Para representar esto, se debe introducir una estructura dinámica para lo cual se proponen los siguientes criterios:

- El tiempo debe dividirse en intervalos discretos tales como t , $t+1$, $t+2$, etc.
- Asumir que el dinero disponible para inversión no está anclado a ningún sector o región en particular. Los inversionistas pueden mover su dinero de un lado a otro para intentar maximizar los beneficios.
- Los productores pueden anticipar dónde van a estar las mayores ganancias en un próximo período como $t+1$, pero la única información de que disponen para hacer esto es las tasas de ganancia en la situación actual t .

Si ${}^{t,t+1}M$ es la cantidad total disponible para la inversión entre los períodos t y $t+1$, una posible distribución será:

$${}^{t+1}M_j^n = {}^{t,t+1}M \frac{{}^t e_j^n}{\sum_{nj} {}^t e_j^n} \quad (5-45)$$

Para transformar el dinero en capacidad instalada se puede utilizar una relación simple:

$${}^{t+1}Q_j^n = {}^{t+1}M_j^n s^n + {}^t Q_j^n \quad (5-46)$$

Donde s^n es el incremento en la capacidad instalada en el sector n que se logra con una unidad de incremento en la inversión.

5.4.4 Elasticidad de la demanda y sustituciones en la cadena de producción

En las secciones precedentes se discutió el tema de los precios. Los precios, sin embargo, afectan la cantidad de productos que se consumen a través de elasticidades. Supongamos que se ha realizado la primera etapa en el procedimiento de cálculo, con lo cual se ha seguido la cadena de producción desde el último eslabón al primero, estimando los precios. Al llegar al primer eslabón, esto es, la demanda final, la cantidad de bienes y servicios puede ser estimada como una función de los precios acumulados, en vez de utilizar los coeficientes fijos. Si los precios son altos, la cantidad consumida será baja y vice versas, lo cual indica una función que decae con una pendiente que depende de la naturaleza de los bienes y el sector específico de la demanda final. En el caso del consumo privado o público (gobierno) las personas o instituciones consumirán menores cantidades de una mercancía si es que el precio de esta se incrementa. En el caso de las exportaciones, a medida que los precios se incrementan, nuestro país será menos competitivo en el mercado mundial, y por lo tanto venderá menos productos.

Se destaca que en esta proposición, las elasticidades sólo aplican a la demanda final, no a las intermedias, tal que sólo aplican en el primer eslabón de la cadena. La base para este argumento es que la elasticidad es una decisión del consumidor final, internos o externos. Los sectores intermedios sólo pueden esforzarse por disminuir costos, pero no pueden decidir acerca de las cantidades a consumir.

Formalmente, se dijo que la demanda por una mercancía en particular se obtenía multiplicando la demanda final por coeficientes técnicos fijos. Ahora estas cantidades se obtendrán con $Y_i^n \ddot{\alpha}^{mn}$ donde $\ddot{\alpha}^{mn}$ es un conjunto de funciones de consumo aplicables sólo a los componentes de la demanda final y calculados como:

$$\ddot{\alpha}^{mn} = f(^1P_i^{mn}, \alpha^{mn}) \quad (5-47)$$

donde $^1P_i^{mn}$ son los precios acumulados en el primer eslabón calculados en (5-42) y α^{mn} es la elasticidad de la demanda del sector m para las mercancías producidas por el sector n . Alternativamente se puede utilizar los costos compuestos $^1\bar{P}_i^{mn}$ calculados en (5-43).

Cuando se introducen elasticidades en el consumo de la demanda final, la secuencia de cálculo adquiere la siguiente secuencia:

- Calcular los costos compuestos de la cadena desde abajo hacia arriba suponiendo ganancias normales.
- Calcular la demanda final utilizando la ecuación (5-47) con elasticidades
- Asignar las compras de todos los sectores y regiones de demanda a los productores suponiendo coeficientes técnicos fijos.
- Comparar la producción asignada a cada sector y región con la capacidad instalada, y ajustar las ganancias en consecuencia

- e) Volver a la etapa a) para recalcular los costos compuestos y proceder iterativamente hasta que toda la producción asignada sea igual a las capacidades dadas para todas las regiones y sectores.

Nótese que el consumo final será ahora diferente de una región a otra y que los flujos entre regiones se modificarán debido a las elasticidades.

El último elemento a incluir en esta propuesta es el de *sustituciones*. Dada su complejidad, sin embargo, no será incluido en la propuesta formal. Las sustituciones pueden definirse como el cambio en la cantidad demandada de un bien que resulta del cambio en el precio en relación a otros bienes. Al contrario de las elasticidades, las sustituciones pueden tener lugar en cualquier eslabón de la cadena de producción. Hay, sin embargo, una diferencia importante entre las sustituciones en la demanda final, comparado con las sustituciones en la demanda intermedia. La sustitución en la demanda final puede ocurrir entre dos bienes cualesquiera. Por ejemplo, los consumidores pueden decidir comprar menos libros sobre modelación de usos del suelo y transporte y comprar más zapatos, si el precio de los libros se incrementa en relación al calzado, aún si los libros y los zapatos cumplen funciones completamente diferentes. En la demanda intermedia esto sólo puede ocurrir entre productos *sustitutivos*, es decir, entre bienes que sí cumplen funciones similares. Por ejemplo, si el precio del marfil se incrementa, un fabricante de teclas para pianos puede reemplazar el marfil por plástico para mantener o reducir costos, pero no incrementará el consumo de otras mercancías con las cuales no se pueden fabricar las teclas de un piano. Otro buen ejemplo de sustituciones es el incremento en la adquisición de maquinaria cuando el costo de la mano de obra se incrementa.

5.5 Conclusiones

En este capítulo se ha hecho una revisión de los modelos macroeconómicos, en particular el modelo input-output como la mejor y más útil representación de un sistema económico que interactúa espacialmente. Capitalizando en los principios de utilidad aleatoria, se ha propuesto una forma específica de modelo multiregional, que puede ser de gran utilidad para la representación de sistemas urbanos o regionales complejos. Se introdujeron al modelo propuesto los importantes conceptos de acumulación de precios, elasticidades y sustituciones. Se discutieron los conceptos de precios normales y anómalos como resultado de la introducción de restricciones a la producción al corto plazo en regiones y sectores. Esto, a su vez, llevó a una representación dinámica específica del sistema.

El modelo general resultante puede ser aplicado de muchas maneras a escalas muy diferentes como la regional o la urbana. En el próximo capítulo aplicamos este modelo general a la localización de actividades en el espacio. El componente de transporte, que juega un rol de gran importancia, afectando todos los aspectos del sistema socioeconómico, requiere un tratamiento espacial, que dejamos para el último capítulo.

6 Localización de actividades en ciudades y regiones

El capítulo anterior presentó un modelo input-output espacial general, que puede ser aplicado a muchos sistemas. En este capítulo se discute la aplicación del modelo general propuesto para representar la localización e interacción de actividades en el espacio urbano o regional. Comienza por describir la dinámica general del sistema de actividades, identificando tres elementos: localización de actividades y el mercado inmobiliario, la relación dinámica entre actividades y el espacio construido, y la relación dinámica entre actividades y transporte. Dadas las características muy particulares de esta última relación, el tema es tratado en el capítulo siguiente.

6.1 Dinámica urbano-regional

En el capítulo anterior, al discutir el tema de los precios anómalos, se propuso una forma específica para representar la dinámica oferta/demanda cuando hay restricciones de corto plazo a la capacidad de producción en determinados sectores y regiones. Si la demanda excede a la capacidad, los precios suben, generando ganancias anómalas o rentas. Estos niveles de ganancias diferentes constituyen el factor determinante para distribuir la inversión e incrementar la capacidad en el período siguiente: dada una cantidad total a invertir entre un período y otro, se puede construir un modelo que distribuya la inversión entre sectores y regiones. Esto, a su vez, determina incrementos en la capacidad de producción para el próximo período de tiempo, generando así nuevas relaciones demanda/oferta.

En el caso de la localización e interacción de actividades en el espacio, el sistema puede interpretarse como personas que desarrollan actividades en lugares determinados que puede denominarse como el *sistema de actividades*. En este sistema, sea a nivel urbano o regional, los principales elementos que generan precios anómalos o rentas son el trabajo, el suelo/edificaciones (espacio), y el transporte. Se debe suponer que la oferta de estos tres elementos está restringida en el corto plazo, y que varían en el largo plazo a través de inversión en el caso del espacio y el transporte, y a través de migraciones en el caso de la obra de mano. Estas relaciones oferta/demanda generan una estructura dinámica, como se muestra en la Figura 6-1.

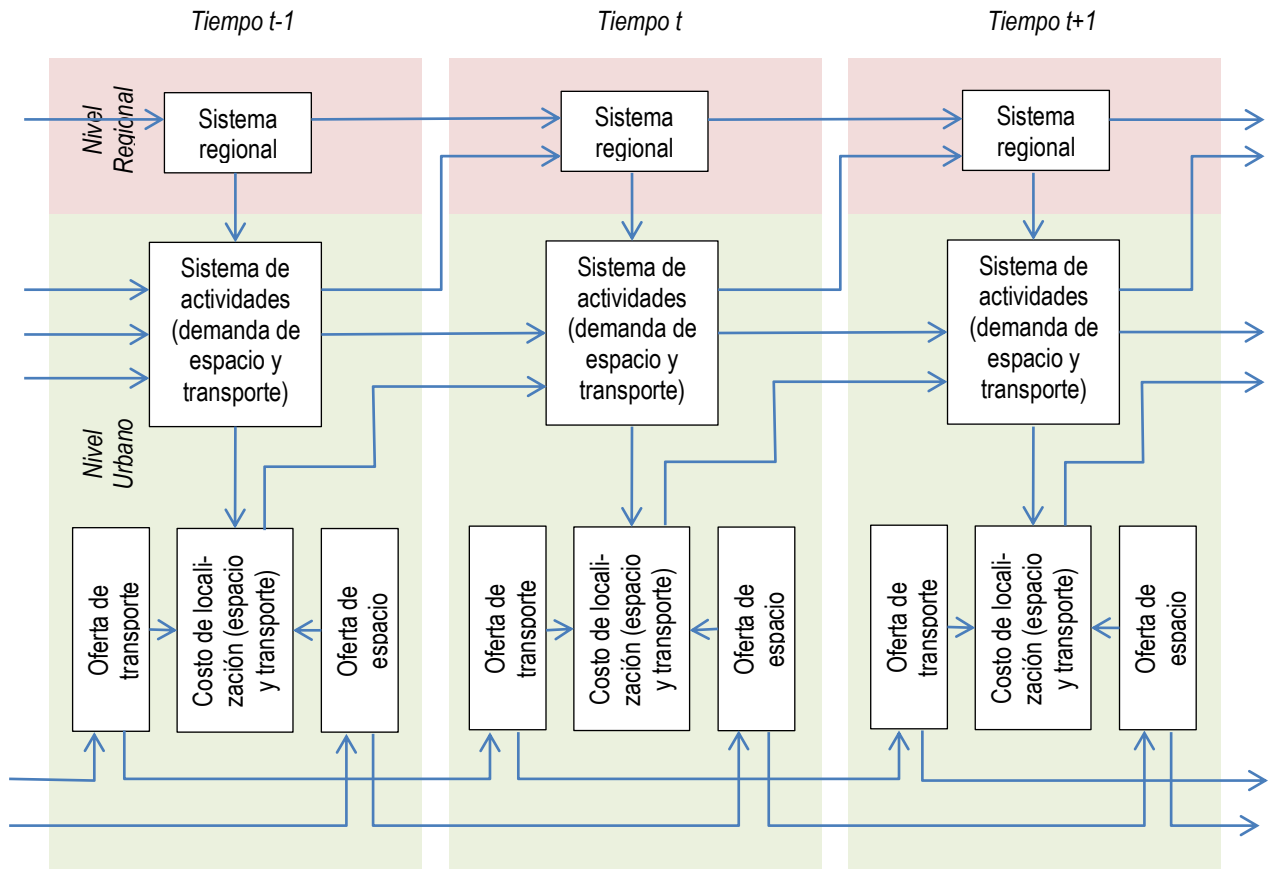
El sistema de actividades representa una demanda por estos tres elementos, pero las características de cada uno pueden variar. La más típica es suelo/superficie construida, que pueden verse como una mercancía conjunta llamada *espacio*. En el sistema regional, por ejemplo, las ciudades y su entorno rural representan la oferta actual de espacio, que puede ser considerada como fija en cada período. El sistema de actividades demanda espacio en determinados lugares, y las relaciones oferta/demanda determinan los precios anómalos o renta de la tierra. En un período siguiente los inversionistas introducirán nueva oferta donde fueron más rentables en el pasado.

Esta descripción se acerca bastante a la realidad de la oferta de espacio, aunque el sector público puede distorsionar el mercado al introducir oferta adicional donde considera que es necesario. La oferta de suelo está más sujeta a la intervención del gobierno, no sólo por las regulaciones urbanísticas sino también porque nuevo suelo implica infraestructura de servicios, como vialidad, drenajes, aguas blancas y negras, electricidad, etc.

La oferta de transporte está constituida por la infraestructura, principalmente vías, y por los operadores de transporte tales como autobuses, automóviles, trenes, barcos o aviones. Como la inversión requerida para la infraestructura es tan grande, generalmente la asume el gobierno.

La oferta de mano de obra tiene una naturaleza diferente, ya que es una decisión tomada por grandes cantidades de individuos que están dispuestos a mudarse de un lugar a otro en busca de mejores condiciones de vida. En una ciudad, el estado no puede generar cambios en la oferta de mano de obra directamente, lo cual vale también para las regiones. El estado puede, sin embargo, ejercer un estricto control a nivel internacional, regulando el número de inmigrantes que pueden entrar a un país.

Figura 6-1: Relaciones dinámicas en el sistema de actividades



6.2 El sistema de actividades

Según las conclusiones del Capítulo 5, el sistema de actividades debe ser representado como un modelo input-output. Ha habido varios esfuerzos para aplicar el modelo input-output al sistema de actividades, especialmente en áreas urbanas. Un muy buen punto de partida fue aportado por Broadbent (1973), aunque la propuesta está basada en *análisis de actividades*, más que input-output. El análisis de actividades tiene una estructura similar al modelo input-output, pero la matriz central está organizada de manera diferente: las filas representan mercancías y las columnas representan actividades, con una última columna para representar restricciones. El arreglo mercancías-actividades simplifica la aplicación de métodos de programación lineal, con los cuales a menudo se le confunde. El análisis de actividades es un modelo, mientras que la programación lineal es una técnica o método para resolver sistemas numéricos.

En el análisis de actividades, las mercancías son las entidades del sistema, y se producen o consumen por las diversas actividades. Las actividades, a su vez, son transformaciones de mercancías input en mercancías output. La relación entre las actividades y las mercancías están representadas en una matriz mercancía-actividad a^{mn} , que representa la cantidad de input o output de la mercancía m que requiere o produce la actividad n . Un valor positivo representa un output, un valor negativo es un input. Las restricciones son elementos dados exógenamente, y pueden incluir inputs básicos (negativos) o demandas finales (positivas).

El elemento crucial en la proposición de Broadbent es que se puede identificar con los coeficientes del análisis de actividades a un conjunto de modelos de interacción espacial. Al hacer esto, se hace posible la aplicación del análisis de actividades en áreas urbanas. Más aún, se puede utilizar el dual para la evaluación económica. El autor concluye que el modelo directo se puede utilizar para determinar la distribución de actividades que satisfacen demandas dadas, y el dual para determinar la distribución de costos (o beneficios). El uso del dual en evaluación no se desarrolla ni aquí ni en la proposición original de Broadbent, pero la forma de los indicadores resultantes se acerca bastante a los costos compuestos de la teoría de utilidad aleatoria.

También ha habido intentos de representar el modelo de Lowry como insumo-producto. Un antecedente importante a esta línea de investigación es un trabajo de Garin (1966) en que el modelo de Lowry es representado en forma matricial, con lo cual se acerca a una estructura input-output. Esto también fue intentado por McGill (1977) que tomó como punto de partida la proposición de Broadbent e interpretó el modelo de Lowry como un input-output. La propuesta de McGill no sólo es una reinterpretación, sino una extensión del modelo original de Lowry, al permitir interacciones entre todas las actividades. Este es el enfoque que se adopta en las secciones siguientes.

Con los elementos desarrollados en el capítulo anterior, la formulación de un modelo general de localización de actividades es un asunto casi trivial. La principal diferencia entre un sistema de actividades y una formulación general input-output, es que cada sector de la economía está definido en términos del número de personas involucradas en la producción, esto es, empleos. La definición puede extenderse para incluir todo tipo de actividades, productivas o no, como residentes. El empleo y la población se convierten en las principales variables.

Al igual que en modelo input-output, se debe hacer una distinción entre los sectores de la demanda final y los intermedios, que también suelen llamarse actividades básicas e inducidas. Las actividades generan numerosas relaciones funcionales, similar a los flujos de mercancías en el modelo input-output. En este caso, sin embargo, un flujo típico representa el número de actividades en un sector y zona en particular originados por una actividad en una zona. El resto del sistema se mantiene inalterado con respecto al modelo input-output basado en teoría de utilidad aleatoria propuesto en la sección 5.4.1 con idéntica solución iterativa.

Por conveniencia repetimos aquí la ecuación (5-34):

$$r x_{ij}^{mn} = r^{-1} X_i^m a^{mn} \frac{\exp(-\beta^n V_{ij}^n)}{\sum_j \exp(-\beta^n V_{ij}^n)} \quad (5-34)$$

donde $r x_{ij}^{mn}$ ahora es el número de actividades del sector n en la zona j generado por actividades m en la zona i , y donde r es el número de la iteración. La función de utilidad puede adoptar diversas formas, y para un modelo de localización de actividades podría ser:

$$V_{ij}^n = c_{ij}^n + \tau^n r_j \quad (6-1)$$

donde c_{ij}^n es el costo compuesto de transporte de i a j para el sector n , r_j es el precio del suelo en j y τ^n es un parámetro que regula el efecto de los precios del suelo en la localización, que se combina con β^n para el efecto del costo compuesto de transporte. Está implícito que los valores del suelo generan una influencia negativa sobre la localización de actividades porque imponen un costo más alto a los hogares o las empresas.

La estructura general del modelo puede verse en la Figura 6-2, donde se hace referencias al período actual y uno previo. Datos dados al modelo referidos al período anterior son la localización de actividades, valores del suelo y costos de transporte. Los datos del período actual son la cantidad de suelo en cada zona, y el crecimiento neto de las actividades básicas y de espacio construido entre el período previo y el actual.

Con esta información, la primera etapa en la secuencia de cálculo es la distribución de los incrementos de las actividades básicas y del espacio construido. Estos incrementos, positivos o negativos, se suman a los del período anterior para formar los totales del período actual y que serán considerados como la oferta fija dada. La localización de los incrementos de empleo básico puede hacerse con probabilidades simples, pero la distribución de los incrementos del espacio construido debe incluir variables muy específicas que serán descritas en una sección posterior.

Una vez se ha determinado el número de actividades básicas y el espacio construido, el procedimiento principal de localización de las actividades inducidas puede realizarse mediante múltiples aplicaciones de la ecuación (5-34) junto con las funciones de utilidad (6-1). Los costos compuestos de transporte se refieren al período anterior y la forma en que se calculan será explicada en el capítulo siguiente. La ecuación (5-34) también producirá estimaciones de los flujos entre pares de actividades.

Una vez las actividades están localizadas en las respectivas zonas, se puede estimar la demanda total de espacio construido con una función de demanda que se verá más adelante. La demanda de espacio construido, $\hat{F}_j$, puede compararse con la oferta fija F_j . Si la demanda es mayor que la oferta, el precio sube, y de lo contrario, baja. Se puede aplicar el siguiente ajuste:

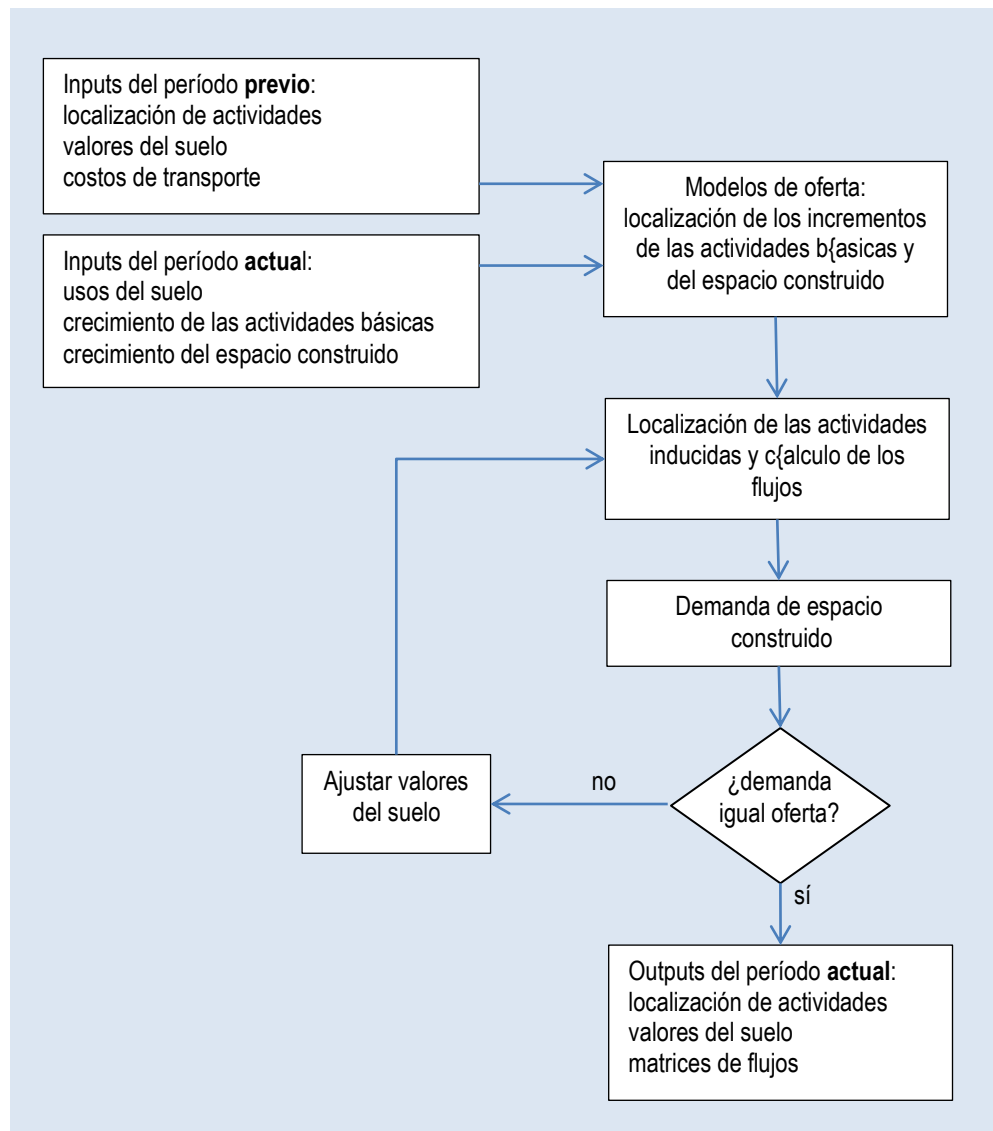
$$\sigma^{+1} r_j = \sigma r_j \frac{\hat{F}_j}{F_j} \quad (6-2)$$

donde σ denota el número de la iteración. Con los nuevos valores del suelo, el proceso de localización de actividades comienza una nueva iteración. El procedimiento se repite una y otra vez hasta que $\hat{F}_j$ se acerque lo más posible a F_j en todas las zonas.

Los principales resultados del modelo de actividad son la localización de actividades en cada zona, la oferta de espacio construido (aproximadamente igual a la demanda), los valores del suelo y un conjunto de matrices x_{ij}^{mn} , el resultado de aplicar la ecuación (5-34), valores todos de la última iteración, que representan las relaciones funcionales entre sectores y regiones. En el próximo capítulo, estos flujos serán la base para calcular la demanda de transporte.

El modelo de actividades descrito puede aplicarse a áreas urbanas o regiones por igual. En una aplicación urbana, el rol de la renta del suelo es muy clara y evidente: partes de la ciudad que se hacen muy atractivas por la accesibilidad u otros factores, presentarán valores del suelo muy altos, y atraerán muchas actividades con baja sensibilidad al costo del suelo, empujando las actividades con mayor sensibilidad hacia zonas más baratas. El resultado de estos procesos son cambios en los usos del suelo, con actividades como el comercio y hogares de bajos ingresos consumiendo pequeñas cantidades de suelo caro. Las actividades de alta sensibilidad, como hogares de altos ingresos, se localizarán en zonas más baratas, consumiendo grandes cantidades de espacio construido y suelo.

A una escala regional los valores del suelo, que en este caso representarán promedios para cada ciudad, serán altos en las regiones atractivas, tal que en el largo plazo algunas actividades tenderán a desplazarse en busca de mejores precios. Este fenómeno puede afectar especialmente a algunos tipos de industria pesada, y afectaría también a las migraciones, ya que si bien en las ciudades atractivas los salarios pueden ser más altos, el costo del suelo y del transporte también serán altos.

Figura 6-2: Estructura general del modelo del sistema de actividades

6.3 La relación dinámica entre la oferta de espacio construido y el sistema de actividades

En esta sección se tratan dos aspectos relacionados con el espacio construido: demanda y oferta. El propósito de un modelo de demanda de espacio construido es la cantidad de espacio que los demandantes están dispuestos a consumir en función del precio. De un período de tiempo a otro, comúnmente se incorpora nueva oferta al mercado, tal que el propósito de un modelo de oferta es estimar la localización de estos incrementos.

6.3.1 Demanda de espacio construido

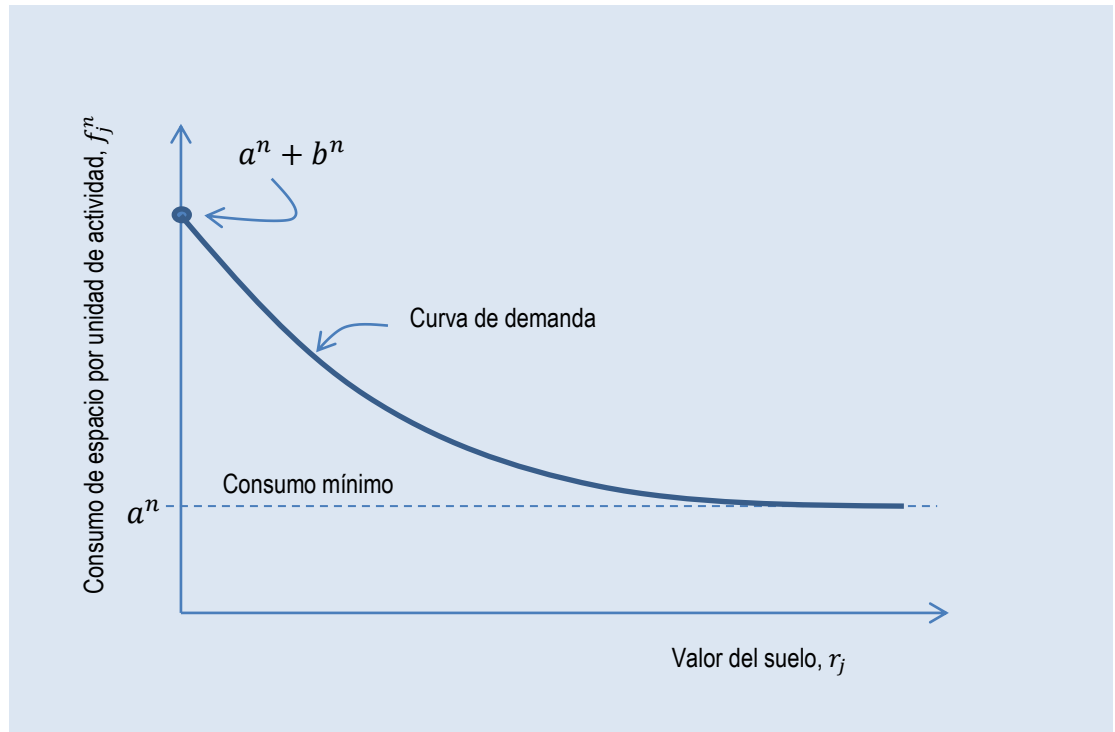
La relación entre el consumo de espacio construido y los valores del suelo está determinada por una función de demanda como la que se muestra en la Figura 6-3, donde la cantidad de espacio construido que está dispuesta a consumir una actividad en una zona j , f_j^n es una función inversa de los valores del suelo. Hay muchas formas de representar una curva de este tipo, siendo una muy conveniente:

$$f_j^n = a^n + b^n \exp(-\delta^n r_j) \quad (6-3)$$

donde a^n , b^n y δ^n son los parámetros de la función de demanda. El parámetro a^n es la mínima cantidad de espacio que una unidad de actividad n está dispuesta a consumir en la zona j si el precio es muy grande. El máximo es $a^n + b^n$ cuando el precio es cero, y δ^n regula la curvatura en pendiente. La demanda total de espacio construido en una zona, $\hat{F}_j$ será:

$$\hat{F}_j = \sum_n X_i^n f_i^n \quad (6-4)$$

Figura 6-3: Curva de demanda de espacio construido



6.3.2 Oferta de espacio construido

Para desarrollar sus funciones, las actividades necesitan suelo y espacio construido, dos bienes inseparables, aunque de naturaleza diferente. El suelo es una mercancía sujeta a transacciones en el mercado como cualquier otra, pero la oferta está deter-

minada de manera importante por el estado, que provee la infraestructura de servicios como agua, electricidad, vías y otras, además que establece las regulaciones urbanísticas. Además hay que distinguir entre suelo potencialmente disponible para el desarrollo y el suelo como oferta efectiva, que cuenta con la infraestructura que ha provisto el estado y por lo tanto está disponible en el corto plazo. Cómo estos factores que hacen que el suelo sea efectivo depende de decisiones y políticas gubernamentales, para este modelo será un dato.

La oferta efectiva de terrenos en los que se pueden levantar edificios se concibe como un factor de oferta a ser logrado mediante inversión. Una vez se cuenta con la infraestructura básica, el suelo potencial debe ser desarrollado con base en movimientos de tierra, tendido de redes, y servicios básicos. Para efectos analíticos todas estas provisiones serán parte de la provisión del espacio construido. En otras palabras, se considera que la oferta potencial es una variable exógena sujeta a la regulación urbanística, y la provisión de parcelas y edificios será considerada como una mercancía sujeta a mecanismos de mercado bajo el supuesto de oferta restringida. El propósito de los párrafos que siguen es el construir un modelo que simule el comportamiento de los suplidores de espacio construido, representando la forma como responden a la demanda, dado que existe un stock, suelo disponible y patrones de accesibilidad.

Hay dos cuestiones que deben ser consideradas en la estimación de la oferta de espacio construido. La primera se refiere a la cantidad total de espacio en el área de estudio, ya sea en un país al nivel regional, o una región al nivel urbano. Este tema ha sido tratado por muchos autores como Muth (1968, 1969), Kirwan y Martin (1970), Goodal (1972) y Mills (1969). El crecimiento global del sector inmobiliario es ciertamente complicado, que depende de elementos como el crecimiento económico nacional, desarrollo de la industria de la construcción, incentivos gubernamentales, disponibilidad de materiales de construcción, disponibilidad de créditos, ingreso de la población, y otros. De allí que aquí se le considere como un dato exógeno al modelo.

La segunda cuestión es la distribución espacial del incremento de espacio construido global dado. Uno de los primeros modelos de distribución de un incremento dado de espacio es debido a Hansen (1959). Luego Echenique, Crowther y Lindsay (1969) propusieron un modelo similar, y lo incorporaron a la estructura de un modelo de Lowry para restringir la localización de las actividades. Estos modelos tempranos son tomados aquí como punto de partida.

Lo que se requiere es la definición de una función de utilidad, asumiendo un comportamiento racional de los proveedores de espacio construido. Con esto se puede asignar a cada zona una alícuota del incremento total de acuerdo con una probabilidad *a priori* y al beneficio relativo esperado que los proveedores perciben de cada localización.

La probabilidad *a priori* puede definirse como el *espacio construido potencial* que puede construirse en cada zona, esto es, la diferencia entre lo que permiten las regulaciones y la cantidad de espacio construido que ya existe:

$${}^{t+1}H_j^P = {}^{t+1}H_j^R - {}^tH_j \quad (6-5)$$

donde ${}^{t+1}H_j^P$ es el nuevo suelo potencial para el próximo período en la zona j , ${}^{t+1}H_j^R$ es la cantidad máxima que permiten las regulaciones urbanísticas y tH_j es el espacio construido que ya existe en cada zona. La ecuación (6-5) supone que los promotores inmobiliarios conocen anticipadamente las regulaciones urbanísticas del período siguiente.

Los beneficios que los productores esperan obtener en la zona j en el próximo período $t+1$, ${}^{t+1}U_j$ pueden estimarse como la diferencia entre el precio r_j en cada zona y los costos de producción b_j :

$${}^{t+1}U_j = {}^tr_j - {}^tb_j \quad (6-6)$$

El costo de producción debe calcularse fuera del modelo para incluir elementos como el costo de construcción, infraestructura, impuestos, etc. La densidad afecta el costo de construcción, ya que es más caro construir edificios altos que viviendas unifamiliares. Nótese que tanto el precio como el costo se refieren al período actual, ya que los productores no pueden estar seguros acerca del precio en el siguiente período, pero sí saben la diferencia entre precio y costo actuales, la única base para su planificación. La nueva superficie a construir en cada zona, ${}^{t+1}dH_j$ puede calcularse como:

$${}^{t+1}dH_j = {}^{t+1}dH \frac{{}^{t+1}H_j^P {}^{t+1}U_j}{\sum_j {}^{t+1}H_j^P {}^{t+1}U_j} \quad (6-7)$$

donde ${}^{t+1}dH$ es la cantidad total de espacio que se piensa construir en el período $t+1$. El espacio total a futuro en cada zona será, entonces:

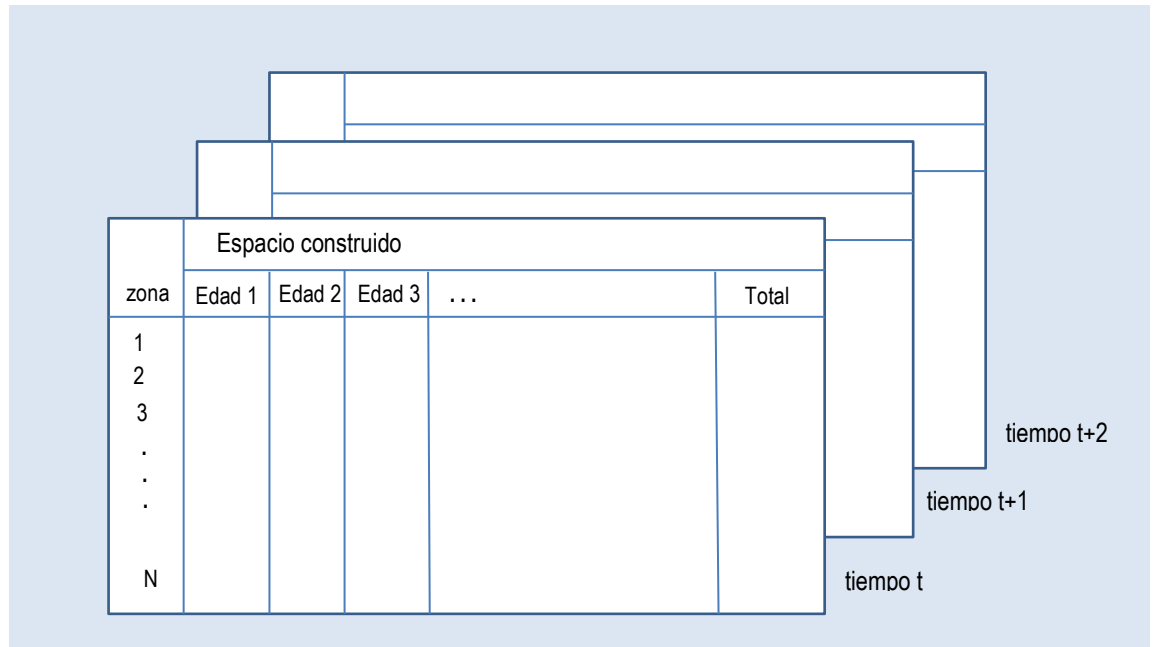
$${}^{t+1}H_j = {}^tH_j + {}^{t+1}dH_j \quad (6-8)$$

El modelo propuesto contiene varios supuestos simplificativos, el principal de ellos el considerar un solo tipo de edificación de la misma edad. El espacio construido puede clasificarse en diversos tipos como residencial, comercial, industrial, y otros. A su vez el residencial puede desagregarse en unifamiliar, multifamiliar, mixto, vivienda social, favelas, etc. Anas (1982) examinó este tema en bastante detalle, e introdujo el concepto de sub-mercados. Desde el punto de vista del modelo de oferta, es cuestión simplemente de introducir el índice respectivo para representar el tipo f a la ecuación (6-7), que quedaría como:

$${}^{t+1}dH_j^f = {}^{t+1}dH \frac{{}^{t+1}H_j^{Pf} {}^{t+1}U_j^f}{\sum_j {}^{t+1}H_j^{Pf} {}^{t+1}U_j^f} \quad (6-9)$$

La ecuación (6-9) implica que el incremento total de superficie construida es distribuido simultáneamente a zonas y tipos de acuerdo a los márgenes de ganancia en cada caso. Nótese que el suelo potencial también debe ser desagregado por tipo, ya que las regulaciones pueden limitar algunos tipos específicos en determinadas zonas. Por ejemplo, puede haber una zona residencial que no permite edificios en altura.

La edad de los edificios también puede ser incorporada al análisis, para lo cual se puede dividir el stock por grupos de edad k . El stock ${}^tH_j^q$ puede arreglarse en forma matricial de la siguiente manera:



Esta matriz puede ser operada con un modelo dinámico basado en cadenas de Markov para simular la cantidad de espacio construido en cada zona y grupo de edad y período de tiempo. Se pueden establecer las siguientes relaciones:

$${}^{t+1}H_j^q = {}^tH_j^q p^q + {}^{t+1}dH_j, \quad \text{para } q = 1 \quad (6-10)$$

y

$${}^{t+1}H_j^q = {}^tH_j^q p^q + {}^tH_j^{q-1} (1 - p^{q-1}), \quad \text{para } q > 1 \quad (6-11)$$

La ecuación (6-10) estima la cantidad de superficie construida en el primer grupo de edad ($q=1$) como la cantidad que ya existía en el primer grupo en el período t , ${}^tH_j^q$ multiplicado por la probabilidad que el stock siga en el mismo grupo de edad, p^q . A este stock que sobrevive en el primer grupo de edad hay que sumar el nuevo stock, ${}^{t+1}dH_j$, que 'nace' naturalmente al grupo de edad 1.

La ecuación (6-11) establece que para todos los grupos de edad mayores que 1, la cantidad de espacio construido en una zona en el período $t+1$ es igual al stock que 'sobrevivió' en el mismo grupo etario ${}^tH_j^q p^q$ más el stock que 'envejeció' del grupo anterior, ${}^tH_j^{q-1} (1 - p^{q-1})$. Naturalmente p^q debe ser menor que 1. Nótese también que en cada período de tiempo hay un stock que desaparece del todo a una tasa de ${}^tH_j^Q (1 - p^Q)$, donde Q es el último grupo de edad.

Otra mejora que se puede introducir al modelo es la consideración de demoliciones. En la Figura 6-4 se hace una distinción entre diferentes tipos de suelo. Una cierta cantidad de suelo en una zona está ocupado por edificaciones, y el resto está disponible vacante. El área sombreada representa la cantidad de suelo existente, tH_j . El nuevo

stock a agregar en el próximo período de tiempo puede ser de dos tipos: nuevas edificaciones construidas sobre suelo vacante ($v=1$) y nuevo stock construido sobre suelo ocupado ($v=2$). El costo de construcción es diferente en ambos casos, ya que en el tipo $v=2$ hay que agregar el costo de las demoliciones. De esta manera el nuevo stock pasa a ser ${}^{t+1}dH_j^v$, donde v denota la condición de vacancia. La ecuación (6-9) se transforma en:

$${}^{t+1}dH_j^v = {}^{t+1}dH \frac{{}^{t+1}H_j^{Pf} {}^{t+1}U_j^v}{\sum_{jv} {}^{t+1}H_j^{Pf} {}^{t+1}U_j^v} \quad (6-12)$$

La ecuación (6-12) representa la elección de los promotores inmobiliarios: construir en espacio vacante o reemplazar edificios viejos por nuevos. Los costos serán diferentes, con lo cual las utilidades de cada opción también serán diferentes, y ello afectará a las probabilidades de elección. El precio de venta será el mismo en ambos casos, ya que los compradores serán indiferentes acerca de la condición de vacancia que existía antes de la construcción de los edificios.

Para simplificar esta presentación, muchos aspectos se han dejado por fuera. En particular, las densidades han estado implícitas y sólo se han mencionado porque influyen en el costo de construcción y en las demoliciones. El concepto de los sub-mercados puede elaborarse con el lineamiento de Anas (1982), en el cual se debe restringir algunas actividades con respecto a ciertos tipos de edificaciones, como la industria, comercio, escuelas, etc. La vivienda pública también debe estar representada en el modelo para sumar al stock total, restringido a la actividad residencial.

Otro aspecto importante a considerar, particularmente en los países en desarrollo, es la inclusión de un sector de vivienda informal. En muchas ciudades del tercer mundo el sector informal representa una porción importante del mercado inmobiliario. Una manera posible de incluir el sector informal es la que se describe a continuación, que comienza por remover el parámetro de consumo mínimo a^n en la ecuación (6-3):

$$f_j^n = b^n \exp(-\delta^n r_j) \quad (6-13)$$

Esta ecuación sigue representando la cantidad de espacio construido que una actividad n está dispuesta a consumir si el precio es r_j , pero en este caso la función de demanda converge a cero a medida que aumenta el precio. Como las actividades no pueden consumir por debajo de un mínimo a^n , el modelo debe proceder de la siguiente forma:

En la primera iteración todas las actividades están en el sector formal.

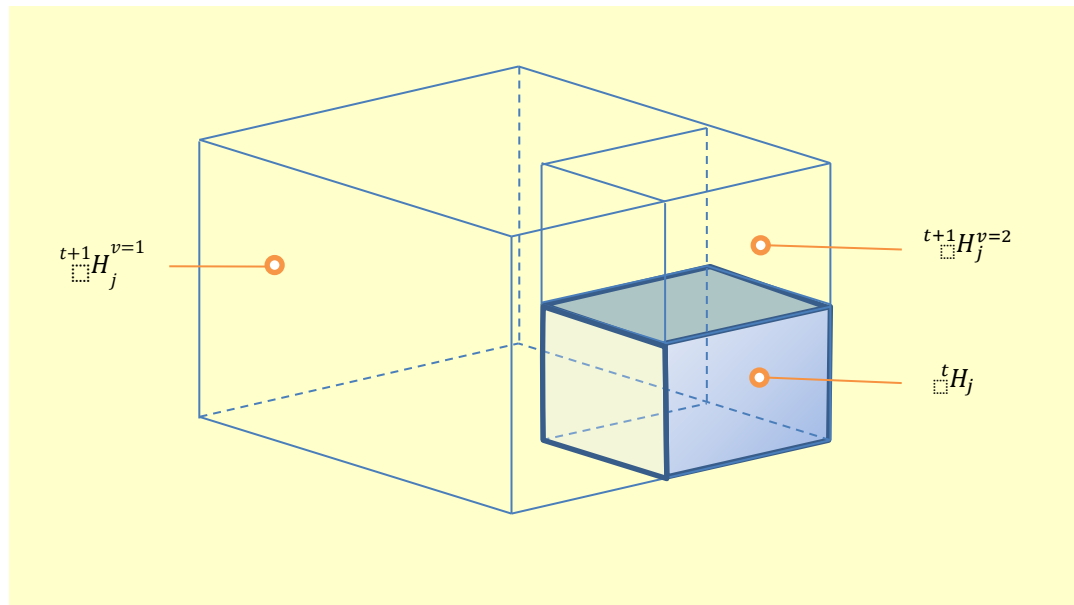
Una vez todas las actividades han sido localizadas en zonas se computan las funciones de demanda (6-13)

Todas las actividades cuyas funciones de demanda hayan caído por debajo del mínimo a^n son asignadas al sector informal y re-localizadas con un sub-modelo separado. En una segunda iteración, debido a que ahora hay menos población compitiendo por la misma cantidad de espacio construido, los precios bajarán, y como consecuencia

parte de los que se había ido al sector informal puede traerse de vuelta al formal. El procedimiento se repite hasta llegar a un equilibrio.

En una estructura dinámica, si el espacio construido crece más lento que las actividades, el sector informal crecerá. La vivienda pública incrementará el stock de oferta, con lo que reducirá los precios y reducirá también la población informal. A un nivel regional, este modelo puede explicar las diferencias en las proporciones de población informal de una ciudad a otra.

Figura 6-4: Diferentes tipos de espacio construido potencial



6.4 Migraciones regionales

En cualquier país, la población se mueve de una región a otra por diversas razones, siendo la principal la búsqueda de mejores oportunidades laborales. Hay, sin embargo, otras razones, como la búsqueda de mejores servicios, costo de vida más bajo, vivienda más barata, mejor clima y entorno ambiental, y otras. En un área urbana las familias también se mueven de un sector a otro por razones similares, pero los pesos dados a cada variable pueden variar. Un elemento que limita los cambios de localización de la población es el costo de la mudanza, tanto económico como psicológico, lo cual afecta particularmente a las migraciones regionales.

En análisis demográfico tradicional, los movimientos migratorios a escala regional se representan a través de tasas migratorias. Este es el caso del modelo de supervivencia de cohortes, bien documentado en Rogers (1968). Una *cohorte* es simplemente una categoría de población, generalmente definida en términos de edad y sexo. De data conocida se puede estimar las tasas a las cuales migra la población para cada cohorte, y cuando se incluye la edad, las tasas migratorias se combinan con probabilidades de

supervivencia. Tomando como base series históricas, las tasas son proyectadas a futuro, y como resultado se obtiene predicciones del número de migraciones desde o hacia una región.

Este enfoque se puede criticar desde varios puntos de vista. No permite el cálculo de matrices, y se dejan fuera variables importantes como disponibilidad de empleos y la accesibilidad entre regiones. Por estas razones los modelos gravitatorios se popularizaron tempranamente con los trabajos de Zipf (1949), Lowry (1968), Masser (1969) y Wilson (1974). Wilson, en particular, integró este enfoque con los métodos matriciales desarrollados por Rogers (1968) para representar la edad y las probabilidades de supervivencia.

En el modelo dinámico de actividades descrito en la sección 6.2 la migración está representada implícitamente, ya sea aplicado a nivel urbano o regional. La población es localizada en zonas o regiones en cada período de tiempo en función de la localización del empleo, servicios, accesibilidad y valores del suelo. Los flujos migratorios son, simplemente, la diferencia en la localización residencial entre un período y el siguiente.

Se puede argumentar que esto implica flujos migratorios instantáneos y sin costo. Apenas hay un cambio en cualquiera de las variables que afectan la localización de la población, las personas se desplazan a nuevas localizaciones más convenientes. En el modelo hay, sin embargo, algunos factores limitantes que restringen la velocidad de los cambios. Por una parte los cambios en el empleo son relativamente pequeños, restringidos por factores tales como la disponibilidad de materias primas, mercados y costos de transporte desde sus proveedores. Por otra parte los cambios en el espacio construido son aún más lentos. En los modelos de localización de espacio construido en (6-9) o (6-12), se adoptó un esquema incremental, tal que entre un período y otro, una alta proporción del stock construido permanecerá sin cambios. Como resultado, los precios inmobiliarios subirán, pero puede llevar bastante tiempo para que el costo de las viviendas empuje a la población a cambiar de localización. En el modelo de actividades de las ecuaciones (5-34) y (6-1) la diferencia relativa entre los valores del suelo y la accesibilidad al empleo está regulada por la importancia relativa de los parámetros β^n y τ^n . Si más aún introducimos unas variables de atracción W_j^n en la ecuación (5-34) habrá aún más inercia en el sistema:

$$r_{ij}^{mn} = r^{-1} X_i^m a^{mn} \frac{W_j^n \exp(-\beta^n V_{ij}^n)}{\sum_j W_j^n \exp(-\beta^n V_{ij}^n)} \quad (6-14)$$

donde W_j^n puede incluir a la población del período anterior, o si hay varios tipos de población por grupos socioeconómicos, el atractor puede incluir la suma ponderada de cada grupo en el período anterior.

Aun si el enfoque anterior es una manera conveniente de representar migraciones, no provee una matriz de explícita de flujos migratorios. Sin embargo esto puede lograrse agregando un cálculo post-simulación de la siguiente forma:

$$M_{ij}^n = {}^t R_n \frac{({}^t R_j^n - {}^{t-1} R_j^n) \exp(-\beta^n c_{ij}^n + c^{*n})}{\sum_j ({}^t R_j^n - {}^{t-1} R_j^n) \exp(-\beta^n c_{ij}^n + c^{*n})} \quad (6-15)$$

donde M_{ij}^n representa la migración del grupo n desde i a j , tR_n es la población total del tipo n , $({}^tR_j^n - {}^{t-1}R_j^n)$ es la diferencia entre la localización residencial entre t y $t-1$, y donde c^{*n} representa el costo fijo de migración para el grupo n . M_{ii}^n representa la población que no migra.

6.5 Jerarquías espaciales

En muchas ocasiones puede ser útil dividir el área de estudio en zonas de más de un nivel jerárquico. Si se trata de una aplicación regional, el analista dividirá el país en regiones, pero puede estar interesado en alguna región en mayor detalle, con unidades espaciales más pequeñas. Lo mismo puede ocurrir en un área urbana, en que el interés se centra en determinadas partes de ella. También podría tratarse de una ciudad que mantiene estrechos vínculos con regiones circundantes, caso en el cual puede resultar conveniente dividir toda el área en regiones, donde la ciudad es una de ellas, y luego dividir la ciudad en un segundo nivel jerárquico en zonas más pequeñas. En el Capítulo 8 se describirán algunas aplicaciones de este tipo.

Para representar esto en el modelo del sistema de actividades, la ecuación (6-14) deberá ser modificada de la siguiente forma:

$${}^r x_{ij}^{mn} = {}^{r-1} x_i^m a^{mn} \frac{W_j^{1n} \exp(-\beta^{1n} V_{ij}^{1n})}{\sum_j W_j^{1n} \exp(-\beta^{1n} V_{ij}^{1n})} \frac{W_j^{2n} \exp(-\beta^{2n} V_{ij}^{2n})}{\sum_j W_j^{2n} \exp(-\beta^{2n} V_{ij}^{2n})} \quad \forall j \in J \quad (6-16)$$

donde los subíndices 1 y 2 representan los niveles jerárquicos respectivos, y donde J representa una zona del primer nivel y j una de segundo nivel. La expresión $j \in J$ significa que en la segunda parte de la ecuación la sumatoria se hace sobre todas las zonas j de segundo nivel en las cuales se ha dividido la zona de primer nivel J . La interpretación de la (6-16) es relativamente simple. En el caso de residentes tipo n , la primera probabilidad asignará los residentes a todas las zonas del primer nivel. La probabilidad de localizarse en una zona de segundo nivel será igual a la probabilidad de localizarse en la zona de primer nivel al que pertenecen, multiplicado por la probabilidad de localizarse en la zona del segundo nivel.

6.6 Conclusiones

Este capítulo se ha ocupado principalmente del sistema de actividades, es decir, de explicar la forma en que las actividades se localizan e interactúan en el espacio. La mayoría de los componentes teóricos habían sido tratados en el capítulo anterior, de tal manera que aquí se trataba de aplicar una teoría general a circunstancias específicas. El resultado es un modelo que puede ser aplicado a nivel regional o urbano, y, si se utiliza la formulación jerárquica propuesta, para una combinación de ambas.

Se discutieron, sin embargo, varios temas específicos relacionados con la localización de actividades, siendo la más importante la demanda y oferta del espacio construido. Este es, quizás, una de las áreas de investigación más interesantes de la modelación de usos del suelo, debido a su relevancia en los contextos sociales reales, y por su retadora complejidad. En este capítulo sólo se han abordado los principales aspectos,

dejando vastas áreas de investigación para el futuro. La representación de las áreas informales, de gran importancia para las realidades del tercer mundo, sólo fue sugerida, incluyendo la propuesta de un modelo formal, pero el tema permanece en gran parte inexplorado. El espacio construido sigue siendo el principal consumidor de energía en Europa y USA, de tal manera que este es otro tema de investigación que queda pendiente para la modelación integrada de usos del suelo y transporte (ver Owens, 1986, Rickaby y de la Barra, 1987).

7 El sistema de transporte

La relación entre la localización de actividades y el sistema de transporte ha sido ha sido extensamente discutido en la literatura académica por muchos años, pero es sólo recientemente que ha sido establecida de manera formal. Posiblemente esto se debe al desarrollo histórico de las teorías relacionadas con el uso del espacio y las relacionadas con el transporte, y por el hecho que ambas se desarrollaron en paralelo y en relativo aislamiento.

En los capítulos precedentes se destacó que la mayoría de los modelos de usos del suelo consideran que el sistema de transporte tiene un efecto definitorio en la localización de actividades. Este es un elemento común en la obra de von Thünen (1826), Christaller (1933), Hansen (1959), Wingo (1961), Alonso (1964) y Lowry (1964), así como en la mayor parte de la investigación sobre el tema en los sesenta y comienzos de los 70. Todo estos trabajos, sin embargo, consideraron la accesibilidad o el costo de transporte de una manera ambigua, básicamente exógenos. Hasta en el trabajo de Wingo, que puede considerarse como pionero por el hecho que trabajó tanto los usos del suelo como el sistema de transporte en bastante detalle, los dos elementos permanecieron en compartimentos separados, y las variables de transporte que entran al modelo de usos del suelo se limitan al concepto de '*distancia al centro*'.

A su vez, la investigación en el área de transporte ha encerrado tradicionalmente los aspectos de usos del suelo en el ambiguo concepto de 'demanda', un área cuyo único objetivo es proveer los inputs socioeconómicos para el estudio de transporte. Esto ha generado un importante desbalance entre las detalladas descripciones de las variables relacionadas con transporte y la burda sobre-simplificación del sistema de actividades, generalmente una variable exógena dada. Sin embargo, los planificadores de transporte han expresado su preocupación por la importancia de los usos del suelo innumerables veces, y en este sentido el trabajo de Buchanan (1963) se transformó en un hito. Desde entonces el tema ha sido estándar en la mayoría de los libros de texto y algunos autores se refieren a él de manera explícita (Blunden, 1971). A pesar de esto, el tema se trata de manera referencial, y en la mayoría de los casos no pasa del capítulo introductorio.

Después de los 70 apareció la primera generación de modelos combinados de usos del suelo y transporte, en particular el modelo SELNEC (Wilson et al, 1969, SELNEC 1971, 1972) y los trabajos de Putman (1973, 1975a, b, c), Echenique et al (1973) y de la Barra et al (1974). La característica principal de estos modelos es que los insumos socioeconómicos requeridos por el modelo de transporte son aportados por un modelo de usos del suelo, en lugar de considerarlos como data exógena. La sección siguiente presenta una revisión general de esta generación de modelos que pueden encerrarse (algunos de manera más forzada que otros) en un esquema común denominado *el modelo enlazado de usos del suelo y transporte*. A esto le sigue otra sección en donde se propone un esquema *integrado* para resolver algunos de los problemas del enfoque enlazado. Las secciones finales están dedicadas a la discusión de aspectos

específicos del sistema de transporte, tal como los costos percibidos, generación de viajes, reparto modal y asignación.

7.1 El modelo *enlazado* de usos del suelo y transporte

La Figura 7-1 presenta la estructura general de lo que podría ser un modelo enlazado de usos del suelo y transporte típico. Corresponde al propuesto en de la Barra et al (1974) pero presenta elementos comunes con el modelo SELNEC y la estructura propuesta por Echenique (1973).

La secuencia de cálculo comienza con un modelo regional, que consiste en dos submodelos relacionados: un submodelo de empleo y un submodelo demográfico, que realizan los cálculos de los totales de empleo y población para el área urbana a la cual se va a aplicar el modelo.

La próxima etapa corresponde a la localización de actividades en el área urbana, y consiste en la localización del empleo básico, la población, el espacio construido y el empleo de servicio a partir de los totales estimados por el modelo regional. Estas estimaciones para el área urbana son, a su vez, insumos para el modelo de transporte con sus cuatro etapas tradicionales: generación, distribución y reparto modal, asignación y estimación de costos generalizados.

El modelo de generación de viajes transforma las actividades por tipo en cada zona calculado por el modelo de localización de actividades, en producciones y atracciones de viajes, esto es, el número de viajes que se originan en cada zona y el número de viajes que tienen a cada zona por destino.

El modelo de distribución de viajes conecta las producciones con las atracciones para estimar un conjunto de matrices origen-destino. El modelo de reparto modal divide estas matrices por modo, generalmente público y privado. La distribución y el reparto modal se pueden combinar en un solo modelo como en la ecuación (3-27).

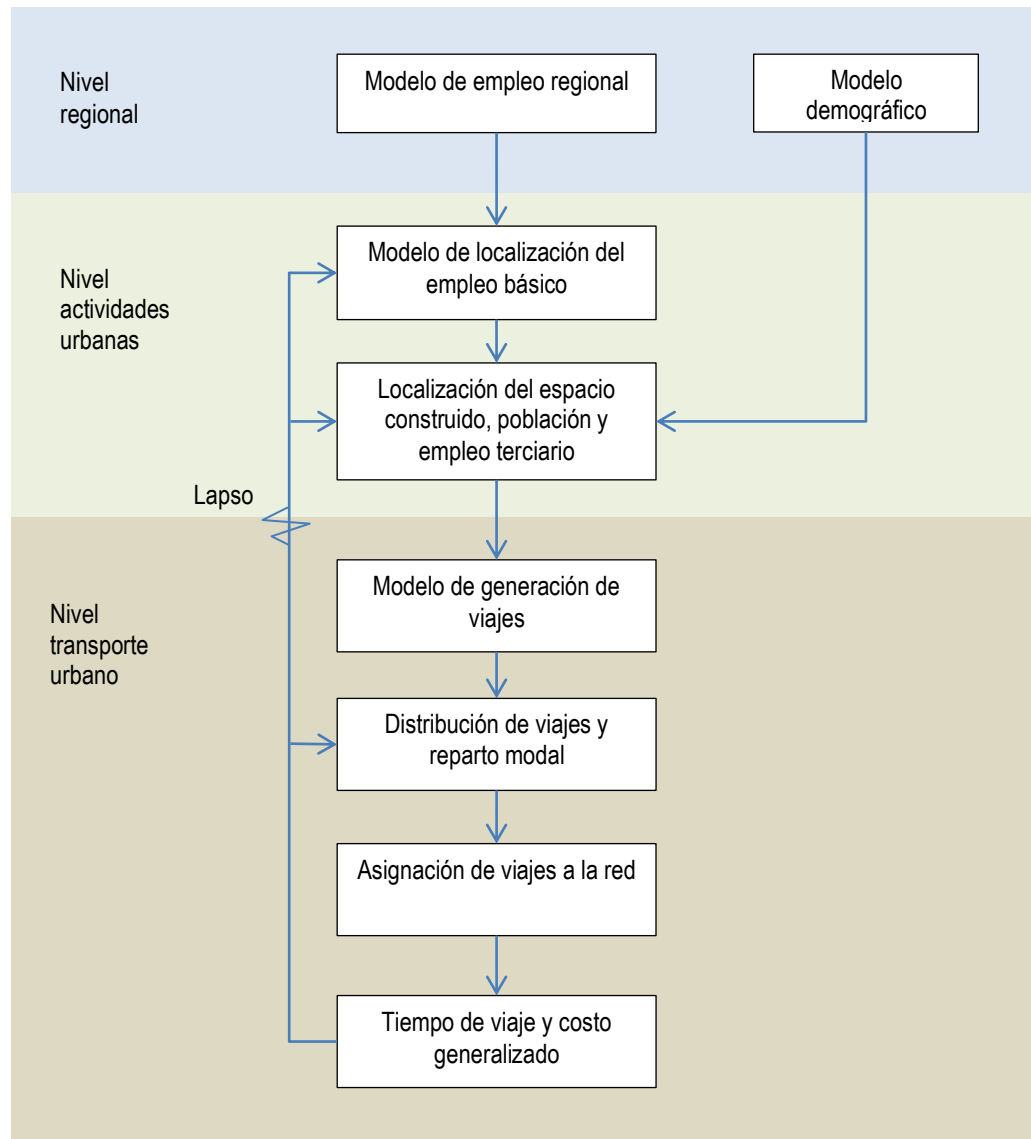
Las matrices de viaje resultantes son asignadas a la red viaria y a las rutas de transporte público por el modelo de asignación. Finalmente todos estos cálculos son utilizados para calcular costos y tiempos de viaje en cada arco en función de la congestión, y con ello los costos y tiempos para cada par origen-destino, desde donde, a su vez, se puede calcular los costos generalizados.

A partir de los costos generalizados se identifican dos retroalimentaciones (*feedbacks*). La primera regresa a la etapa de distribución de viajes, porque a medida que aumenta la congestión en ciertas partes de la red, se afectan tanto la distribución de los viajes como las probabilidades de elección de modo. Esta retroalimentación equivale a un equilibrio entre la demanda y la oferta en el sistema de transporte. Debido a las características del sistema de transporte, este equilibrio se supone que ocurre en el corto plazo (en el mismo período de tiempo), por lo cual no se consideran retardos o lapsos.

La segunda retroalimentación regresa a la localización de actividades, que se ve afectada por los cambios en los costos generalizados de viaje entre zonas. Se supone que este segundo bucle ocurre más lentamente, porque las actividades se toman su tiem-

po para adaptarse a los cambios de accesibilidad, de allí que sea necesario incorporar un *lapso* (*time lag*) de manera explícita.

Figura 7-1: Estructura general del modelo enlazado de usos del suelo y transporte



Como puede verse, los dos elementos clave que relacionan los usos del suelo y el transporte son la generación de viajes y los costos generalizados. Para el cálculo del número de viajes generados o atraídos en cada zona en función del número de actividades, se han utilizado tradicionalmente dos métodos: regresión lineal y *análisis de categorías* desarrollado por Wooton y Pick (1967). El modelo de regresión lineal esti-

ma el número de orígenes o destinos en cada zona como una función lineal del número de actividades. En Echenique et al (1973) y en de la Barra et al (1974), los viajes se dividen en propietarios y no-propietarios de auto particular, y todas las actividades estimadas en el modelo de localización entran en el cálculo. Si se está simulando la hora pico de la mañana, las actividades residenciales son las que resultan con los parámetros más altos de producción de viajes, y los empleos dominan las atracciones. El conjunto de parámetros se calcula por regresión lineal contra datos reales.

El método de análisis de categorías deriva el conjunto de tasas de generación directamente por clasificación cruzada. El número de viajes que hacen los hogares se cruzan con los tipos de hogares, incluyendo factores como tamaño del hogar, número de miembros que trabajan, propiedad de automóvil, ingreso, y otras variables. El método de análisis de categorías fue diseñado como una manera de resolver algunas dificultades en el modelo de regresión lineal, especialmente el de las no-linearidades. Sin embargo, como señala Dale (1977) *‘el análisis de categorías es una forma particular de regresión’*, y los resultados son muy similares. El modelo SELNEC utilizó una variante del modelo de Wooton y Pick con 108 categorías de hogares (ingreso/propiedad vehicular/estructura familiar) y calcularon las atracciones de 8 categorías de usos del suelo.

En general se puede decir lo siguiente acerca de los modelos de generación de viajes:

- a) Las tasas de viajes son inelásticas con respecto a los costos de viaje. Si los viajes son cortos y de bajo costo, las personas tenderán a viajar más frecuentemente, un factor importante que no está incluido en el modelo. Si se introducen nuevas facilidades de transporte, el número total de viajes permanecerá inalterado.
- b) A medida que se aumenta el número de categorías a incluir en el análisis, el número de observaciones tomadas de los datos reales tiende a disminuir, haciendo que los resultados sean menos confiables.
- c) Si se acopla el modelo de transporte a uno de localización de actividades, no tiene sentido que en transporte se tengan muchas categorías que el modelo de usos del suelo no tiene, ya que los datos no estarán disponibles para proyecciones a futuro.

El segundo vínculo entre el modelo de usos del suelo y el de transporte es el cálculo de los costos generalizados de viaje. El propósito de este cálculo es, precisamente, proveer al modelo de actividades un conjunto de matrices de costos generalizados, es decir, los c_{ij} que se han utilizado en las ecuaciones anteriores.

7.2 El modelo integrado de usos del suelo y transporte

Los modelos que se describieron en la sección anterior son el resultado de enlazar dos áreas de investigación que se desarrollaron en relativo aislamiento. Áreas como generación de viajes, distribución, reparto modal, asignación y otras, fueron objeto de investigación independiente por muchos años.

Aparte de lo que ya se ha dicho sobre el modelo de generación, hay otras deficiencias en el enfoque enlazado que merecen ser destacadas. Senior (1977) cuestionó la validez del modelo de distribución en bastante detalle. La cuestión central con respecto a este modelo es la siguiente: si un modelo residencial ha simulado las relaciones entre los lugares de empleo y de residencia, produciendo matrices de flujos hogar-trabajo, ¿por qué debemos tener otro modelo de distribución similar, aunque más limitado, para simular los viajes al trabajo? De hecho el modelo de localización residencial está basado en un modelo restringido en el origen, en términos de maximización de la entropía, que no es idéntico al doblemente restringido que se utiliza en la distribución de viajes, pero que está sirviendo la misma función. El modelo restringido en el origen supone que los empleos son fijos y dados, un supuesto que es consistente con la estructura general del modelo. Al hacer esto simula la matriz x_{ij}^{mn} que sería idéntica a una matriz trabajo-residencia si ponemos las tasas de generación en 1.0. Luego será una tarea relativamente simple el transformar estos flujos funcionales utilizando un modelo de generación de viajes adecuado. En estas circunstancias, el modelo de distribución de viajes está redundante y tiene una interpretación ambigua, y por lo tanto debe ser eliminado de la estructura de modelación.

Un segundo aspecto que puede criticarse en la estructura enlazada es el uso de promedios en el cálculo de los costos generalizados. Este tema se discutió en cierto detalle al describir la teoría de utilidad aleatoria, argumentando que la ecuación (4-11) log-sum es la forma correcta de hacerlo. Esto se analizó en más profundidad con un ejemplo numérico en la sección 4.3. Resulta claro, entonces, que los costos compuestos deben reemplazar a los promedios simples.

En la sección 4.3 se presentó una forma particular de representar y calcular cadenas de decisiones. Se argumentó que para calcular los costos compuestos, la secuencia de cálculo debe seguir la cadena hacia arriba, agregando las utilidades mediante sucesivas aplicaciones de la ecuación (4-11), y luego revertir el flujo para estimar las probabilidades. Luego en la sección 4.4, cuando se introdujeron costos variables y elasticidades, el procedimiento se tornó iterativo.

Este es el caso en el modelo integrado de usos del suelo y transporte. El proceso puede interpretarse como una cadena de decisiones, como se muestra en la Figura 7-2. Al nivel de los usos del suelo las actividades deciden dónde localizarse, en función de, entre otras variables, el costo de la interacción, es decir, x_{ij}^{mn} es función de c_{ij}^n , el costo generalizado de viaje de la actividad n (nótese que se refiere sólo a n , la actividad que se desplaza). La matriz x_{ij}^{mn} puede agregarse a x_{ij}^n para representar la demanda potencial de viajes. Suponiendo elasticidad, la decisión acerca del número de viajes a realizar T_{ij}^n es también función del costo generalizado de viaje c_{ij}^n .

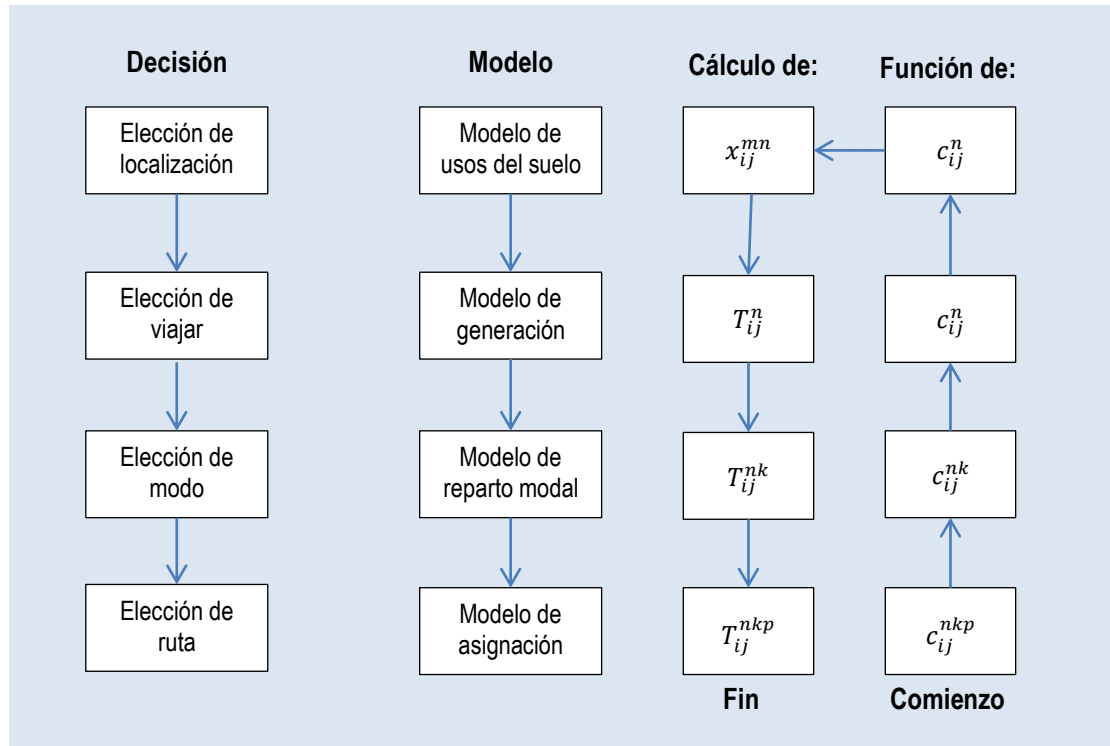
El reparto modal puede interpretarse como elección de modo, representando otro eslabón en la cadena de decisiones. T_{ij}^n se transforma en T_{ij}^{nk} , siendo k el modo, y será función del costo generalizado por ese modo, c_{ij}^{nk} . Finalmente T_{ij}^{nk} debe transformarse en T_{ij}^{nkp} , el número de viajes de i a j de la actividad n que viajan en el modo k por la ruta p , como función del costo correspondiente c_{ij}^{nkp} .

Siguiendo las conclusiones de la sección 4.4 la secuencia de cálculo resultante será ahora:

- a) Comenzar por el último eslabón de la cadena, calculando el costo de viaje a nivel de ruta.
- b) Agregar los costos desde el nivel de ruta a nivel de modo, y a un nivel de origen-destino, que llamaremos aquí el costo compuesto generalizado de viaje.
- c) Realizar los cálculos de la localización de actividades en función de los costos compuestos generalizados.
- d) Estimar el número de viajes con un modelo de generación elástico.
- e) Calcular las probabilidades de elección de modo en función de los costos compuestos por modo.
- f) Calcular las probabilidades de elección de rutas con el modelo de asignación en función de los costos compuestos a nivel de ruta.
- g) Comparar la demanda con la oferta, en este caso, el número de viajes asignados a cada ruta, con la capacidad de la ruta, y ajustar los tiempos de viaje.

El paso g) se denomina *restricción de capacidad*, el proceso mediante el cual se ajustan los tiempos de viaje de acuerdo a la relación demanda/capacidad en cada enlace de la red de transporte. Los tiempos de viaje incrementados por efecto de la congestión lleva la secuencia de cálculo al origen a), para comenzar una nueva iteración.

Figura 7-2: Secuencia de decisiones y secuencia de modelos en el modelo integrado de usos del suelo y transporte



Debe tenerse en mente la estructura dinámica explícita. En este caso un lapso o retardo debe introducirse entre la localización/interacción de actividades y la cadena de transporte. Dado que la elección de zona de destino está integrado a la decisión de localización, el esquema resultante puede denominarse como *integrado* en vez de enlazado.

Lo que queda por discutir son los detalles acerca de cómo se realizan cada uno de los procesos de cálculo en el modelo de transporte, lo cual se presenta uno a uno en las próximas secciones. La presentación comienza por el análisis de redes, que yacen en el corazón de los sistemas de transporte. Luego se presenta el tema de los costos de viaje, junto al de restricción de capacidad. Luego se tratan la separación modal y finalmente la asignación a rutas.

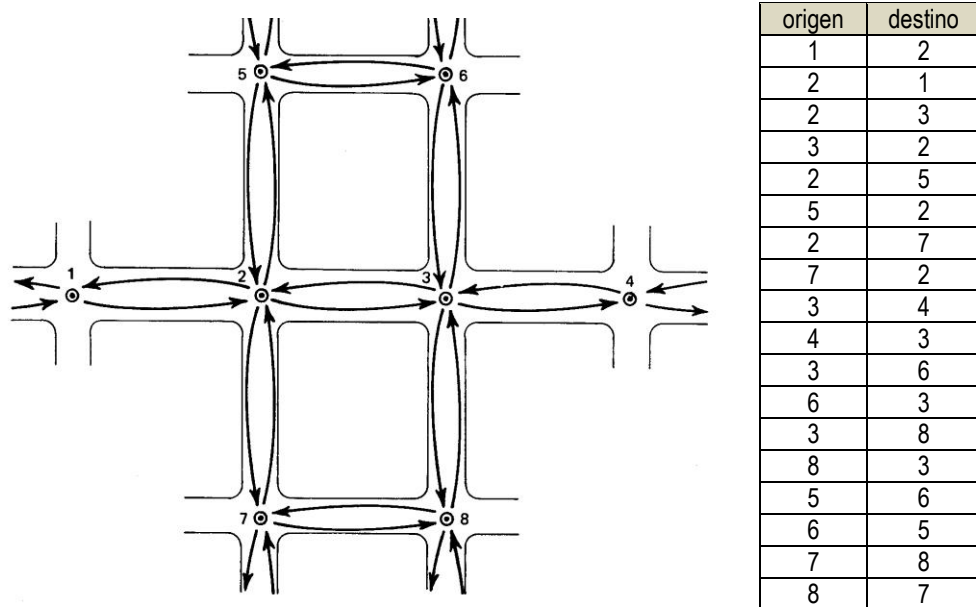
7.3 Análisis de redes para los sistemas de transporte

Hay muchos sistemas que requieren redes para su representación, como los circuitos eléctricos, agua potable, teléfonos, etc. También se utilizan redes para representar secuencias de actividades en un proceso productivo, un área bien cubierta por investigación de operaciones. Esto ha generado toda una rama de las matemáticas: teoría de grafos, y muchas de las técnicas tienen aplicación directa a infinidad de casos

reales. Las redes de transporte son candidatas perfectas, pero hay que hacerlo con cuidado ya que tienen una serie de peculiaridades que las hacen únicas.

En términos muy generales, una red de transporte está definida como un grafo direccional, esto es, un conjunto de nodos conectados por arcos, como el que se muestra en la Figura 7-3. En su concepción más simple, una red de transporte representa la infraestructura física, donde los arcos representan calles y los nodos representan intersecciones. Esta definición puede tornarse más compleja si introducimos ferrocarriles, metros, estaciones, y otras no tan atadas a infraestructuras como las rutas aéreas o marítimas. Otra característica que la hace peculiar es que una red de transporte puede tener rutas, es decir, secuencias fijas de arcos.

Figura 7-3: Típica representación de una red de transporte como un grafo direccional



Número de enlaces: 18 – Número de nodos: 8

En un modelo integrado de usos del suelo y transporte los nodos no sólo representan puntos críticos de la red, donde los viajeros pueden pasar de un enlace a otro. También pueden representar puntos especiales donde los viajes empiezan o terminan, que en este caso pasan a denominarse como *centroides*. Los orígenes y destinos de los viajes en el modelo de actividades ocurren entre zonas, de tal manera que en la red de transporte debe haber un, y sólo un, centroide para representar a cada zona.

Una complejidad adicional en la definición de la red de transporte es la necesidad de distinguir entre tres entes sociales principales: los usuarios, operadores y administradores. Los usuarios representan la demanda, y pueden ser tanto personas como mercancías. Los usuarios perciben un costo de cada viaje que realizan, en función del costo monetario, tiempo, comodidad, y otras variables que veremos más adelante.

Los operadores son individuos u organizaciones que proveen servicios de transporte tales como empresas de autobuses, ferrocarril de carga, líneas aéreas, etc. Los operadores cobran a los usuarios una tarifa y deben pagar costos de operación. Los administradores son los entes a cargo del mantenimiento de la infraestructura, un rol generalmente asumido por el gobierno o quizás concesionarios. Los administradores tienen que sufragar costos de mantenimiento y pueden cobrar a los operadores en términos de peajes, tarifas de estacionamiento o cualquier otra forma. Hay algunos casos peculiares, como los automóviles que son operados por los propios usuarios, o los ferrocarriles que en muchos casos operan y mantienen la infraestructura.

También hay algunos conceptos importantes relacionados con el flujo de tráfico que deben ser tomados en cuenta para el análisis de redes. Estos conceptos son volumen de flujo, densidad, capacidad de un enlace y velocidad. La Figura 7-4 muestra la forma en que estos conceptos se relacionan entre sí:

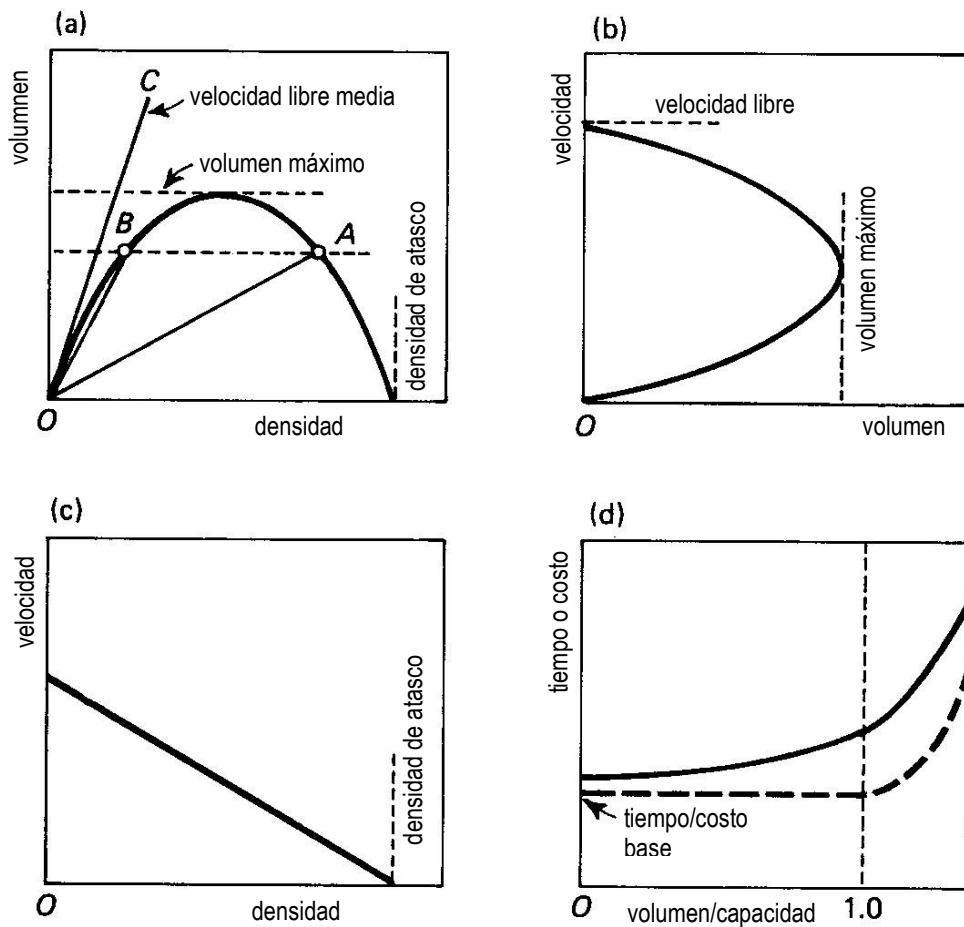
La Figura 7-4(a) relaciona el volumen con la densidad. Cuando la densidad es cero, el volumen también será cero, y también lo será cuando la densidad es máxima (atasco). En algún punto intermedio el volumen será máximo, punto que se define como capacidad del enlace. La velocidad media se define como el flujo dividido por la densidad, es decir la pendiente de OA , OB y OC . OC es la velocidad media a *flujo libre*, equivalente a la velocidad de los vehículos cuando la vía está relativamente vacía. A medida que la densidad se incrementa desde cero hasta el máximo, la velocidad media decrece desde la velocidad a flujo libre hasta cero.

La Figura 7-4(b) es una consecuencia directa de la Figura 7-4(a). Si el volumen del flujo es cercana a cero, la velocidad será máxima e igual a la velocidad a flujo libre. A medida que el flujo aumenta, la velocidad se reduce, hasta que llega a un punto donde el flujo será máximo. De allí en adelante la velocidad se reduce tanto que hace que el volumen se reduzca, hasta que en congestión total el volumen vuelve a ser cero.

La Figura 7-4(c) muestra cómo la velocidad se reduce a medida que aumenta la densidad, desde la velocidad a flujo libre hasta cero.

La Figura 7-4(d) muestra lo que ocurre en un enlace en particular de determinada capacidad. A medida que el flujo aumenta, aumenta la relación volumen/capacidad (V/C), hasta que llega a un máximo cuando $V/C=1$. La parte de la curva cuando $V/C > 1$ es puramente teórica, ya que es imposible que el tráfico sea mayor que la capacidad. Sin embargo, como esto puede ocurrir a lo largo del proceso iterativo de un modelo, la formulación lo incluye. La forma específica de la curva ha sido materia de mucha investigación empírica, lo cual se verá más adelante.

Figura 7-4: Diagramas básicos de flujo de tráfico



Como puede verse, la definición y tratamiento de la red de transporte es bastante compleja e involucra una gran diversidad de tópicos. Una buena parte de las características de la red se describen en el *código de la red*, una lista de arcos con sus características en un archivo de computación. Hay una gran variedad de formatos con los que se puede llenar uno de estos archivos. Es conveniente incluir los siguientes ítems: nodos de origen y destino, longitud, tipo de vía, y capacidad. El tipo de vía se refiere a una serie de características genéricas tales como velocidad a flujo libre por tipo de vehículo, costos de mantenimiento, posibles peajes u otros cobros, etc.

7.3.1 Construcción de pasos

Una vez se cuenta con un buen código de red que describe todas sus características, una de las primeras tareas que deben llevarse a cabo es el conectar cada par origen-destino mediante un *algoritmo de construcción de pasos*. Estos algoritmos están muy

relacionados con los de asignación, pero esto se verá más adelante. Existen dos grandes categorías de algoritmos de construcción de pasos: paso único y pasos múltiples. El algoritmo de paso único intenta buscar en la red el camino que conecte el origen con el destino con el mínimo costo, mientras que el de pasos múltiples intenta buscar *los primeros n-pasos*.

El problema del paso mínimo puede enunciarse como: dada una red de transporte, encuentre el paso de menor costo entre un nodo de origen y uno de destino. Este problema está muy bien cubierto en la literatura, siendo muchos de ellos basados en un algoritmo desarrollado por Dijkstra (1959). More (1963) adaptó el método a redes de transporte. El algoritmo, basado en asociar etiquetas de costos a cada nodo, procede en las siguientes etapas:

- a) Poner todas las etiquetas de nodos en un valor muy grande
- b) Poner la etiqueta del nodo de destino en cero
- c) Examinar todos los nodos conectados al destino (candidatos) y poner en la etiqueta de cada uno el costo de viaje al destino.
- d) Examinar, a su vez, todos los nodos conectados a cada candidato, etiquetándolos con los costos acumulados. Si se encuentra un nodo que ya tenía una etiqueta, escoger el de menor costo y reemplazar los valores de las etiquetas.

El proceso continúa hasta que todos los nodos han sido etiquetados. Desde el punto de vista de computación, el método es muy atractivo, porque termina con un único vector de costos mínimos en cada al destino desde cada nodo. Un segundo vector puede ser computado simultáneamente llamado de *ante-nodos*, que contiene el nodo que le precede en el camino hacia el destino. Estos dos vectores son la manera más económica de almacenar la información de los costos y caminos mínimos desde todos los nodos a un destino final. Este algoritmo ha sido mejorado de diversas maneras por Murchland (1969) y Stoneman (1972). Para minimizar las búsquedas en la red, Shor-treed y Wilson (1968) desarrollaron un método que utiliza el conocido método de búsqueda *heap-sort*. Este método tiene la satisfactoria propiedad de procesar cada nodo una sola vez, reduciendo el cómputo considerablemente. En de la Barra y Pérez (1986) se demuestra que se puede incrementar aún más la eficiencia si los enlaces candidatos se identifican con un código en lugar de sus nodos de origen y destino, con lo cual los ante-nodos se transforman en ante-arcos.

7.3.2 Estimación de los costos de viaje

El algoritmo de la sección anterior requiere que se calcule el costo de viaje en cada enlace de la red. El costo percibido de transporte incluye, como se ha mencionado, diversos componentes. Primero está el costo monetario o la tarifa que un operador cobra a los usuarios. Luego está el tiempo de viaje, que debe ser multiplicado por el valor del tiempo de viaje, el tiempo de espera, que debe ser multiplicado por el valor del tiempo de espera, y los costos terminales, como estacionamiento, tarifas aeroportuarias, almacenamiento, carga y descarga, etc. Como todos éstos dependen del usuario, el valor resultante será c_{ij}^{nkp} que representa el costo percibido por el viajero

tipo n desde i a j por el modo k en el enlace l del paso p . El costo total a lo largo del paso será la suma sobre todos los enlaces que lo conforman:

$$c_{ij}^{nkp} = \sum_l c_{ij}^{nkp_l}, \quad \forall l \in p \quad (7-1)$$

El valor del tiempo de cada usuario tipo n es un concepto subjetivo y uno de los temas más debatidos en el análisis de transporte. Esencialmente su valor debe obtenerse por calibración contra datos reales. Generalmente, en el caso de las personas, el valor del tiempo se relaciona con el ingreso, pero en el caso de las mercancías, su estimación es más difícil. El hecho que cada tipo de usuario presente valores del tiempo diferentes y que además sólo puedan usar determinados modos (la carga no puede viajar en autobús) hace que los pasos deban ser estimados por separado para cada categoría.

7.3.3 Representación del transporte público

En el caso del transporte público, la búsqueda de pasos debe incluir la posibilidad de transferencias entre rutas y operadores. En de la Barra y Pérez (1986) esto se resuelve multiplicando las dimensiones de la búsqueda. En la etapa (c) del algoritmo de paso mínimo, los nodos candidatos fueron definidos como los enlaces conectados al nodo de destino. En este caso los candidatos serán combinaciones entre enlaces y modos o rutas, y cada combinación representará un costo. Más aún, si a lo largo de un paso hay un cambio de operador o ruta, se debe agregar un posible costo de transferencia y tiempo de espera. Para llevar registro de la secuencia, el ante-enlace debe ser también ante-ruta u operador.

7.3.4 Prohibiciones de giro

Hasta ahora el algoritmo asume que los usuarios pueden pasar libremente de un enlace a otro conectado. Sin embargo es muy común que en áreas urbanas existan *giros prohibidos* que limitan estas posibilidades. Por ejemplo, en la Figura 7-3 todos los giros a la izquierda de la avenida principal podrían estar prohibidos, una práctica común para mejorar el flujo en áreas congestionadas. Esto afectará las intersecciones 2 y 3. Giros como 1-2-5 ó 4-3-8 ya no serán permitidos, de tal manera que alcanzar 5 desde 1 sólo habrá dos pasos posibles:

$$1-2-3-8-7-2-5 \quad \text{y} \quad 1-2-7-8-3-6-5$$

El algoritmo de pasos que se describió anteriormente no puede describir el primero de estos pasos, porque implica la repetición del nodo 2. En un camino los nodos son procesados una sola vez, y por lo tanto no pueden repetirse. Por otra parte, si se permitiera la repetición de nodos no sólo los pasos anteriores serían posibles, sino todo tipo de pasos absurdos en forma de bucles.

La forma tradicional de representar giros prohibidos en una red de transporte es mediante la expansión de los nodos. Cada nodo que representa una intersección donde hay un giro prohibido se divide en varios nodos unidos por enlaces ficticios o virtuales. La Figura 7-5 muestra la mínima expansión requerida para representar giros prohibidos a la izquierda en los nodos 2 y 3. Por ejemplo, el nodo 2 se ha dividido en

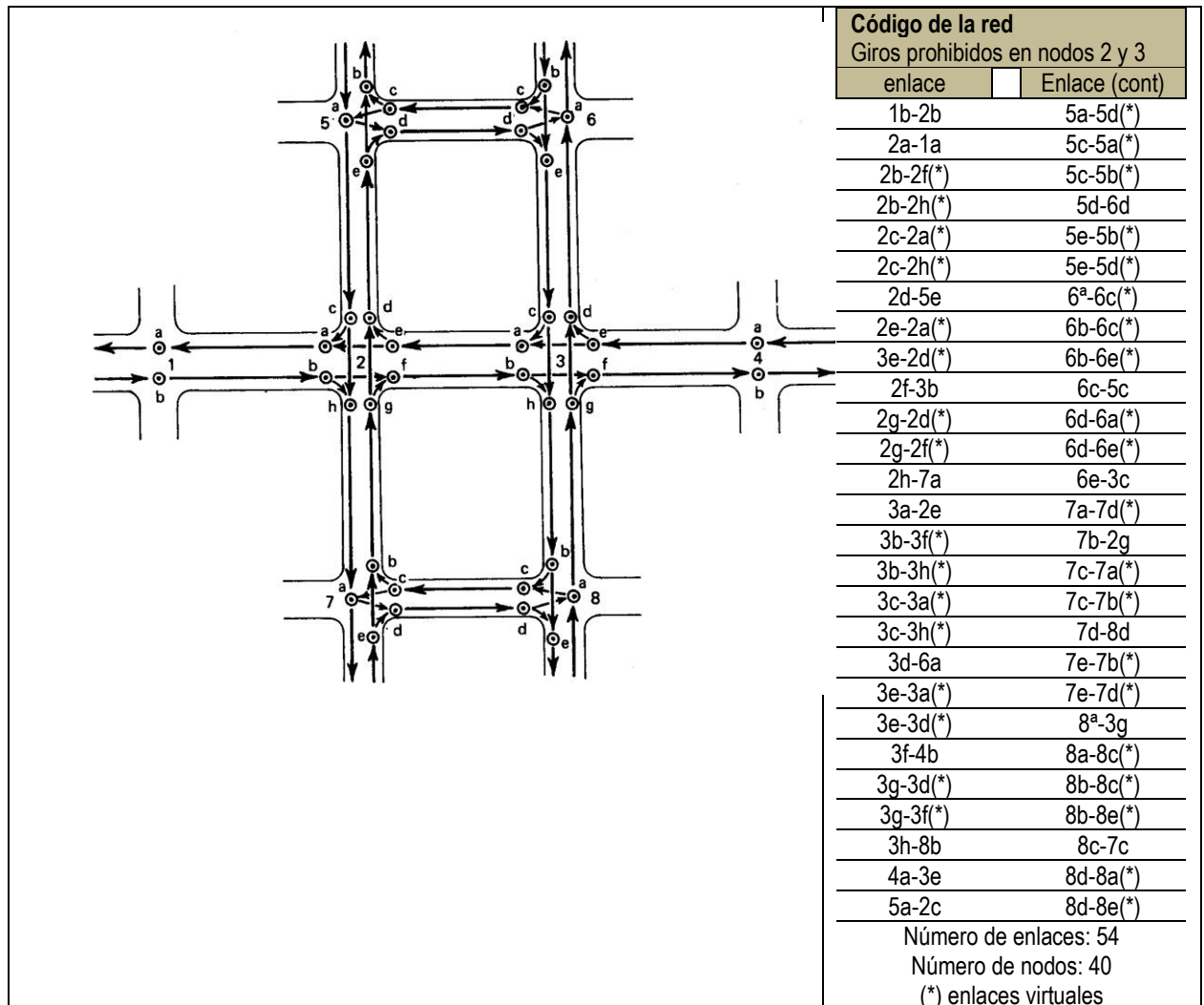
2a, 2b,..., 2h. Nótese que, aún si sólo hay prohibiciones en las intersecciones 2 y 3, es necesario expandir todas las intersecciones, Si, por ejemplo, la intersección 7 se deja con un solo nodo, el algoritmo encontraría que el camino más corto de 1 a 5 es 1b-2b-2h-7-2g-2d-5, que sería equivocado.

Esta manera de representar giros prohibidos tiene una serie de problemas:

- El diseño de la red expandida es una tarea difícil y lleva mucho tiempo
- Los nodos y enlaces virtuales incrementan sustancialmente el tamaño de la red y por lo tanto el tiempo de cómputo
- Es susceptible a errores porque el algoritmo puede utilizar los nodos de maneras que no se esperaban (como en el ejemplo anterior)
- Aún si el analista sólo quiere representar giros prohibidos en unas pocas intersecciones, se ve obligado a expandir un número mucho mayor de ellas.
- Los resultados del modelo contienen una gran cantidad de información innecesaria

La mayoría de los modelos de transporte hoy en día incluyen un proceso automatizado para expandir los nodos cuando hay giros prohibidos, pero hacen sólo los nodos afectados, con lo cual están sujetos a muchos errores.

Figura 7-5: Método de los nodos expandidos para representar giros prohibidos

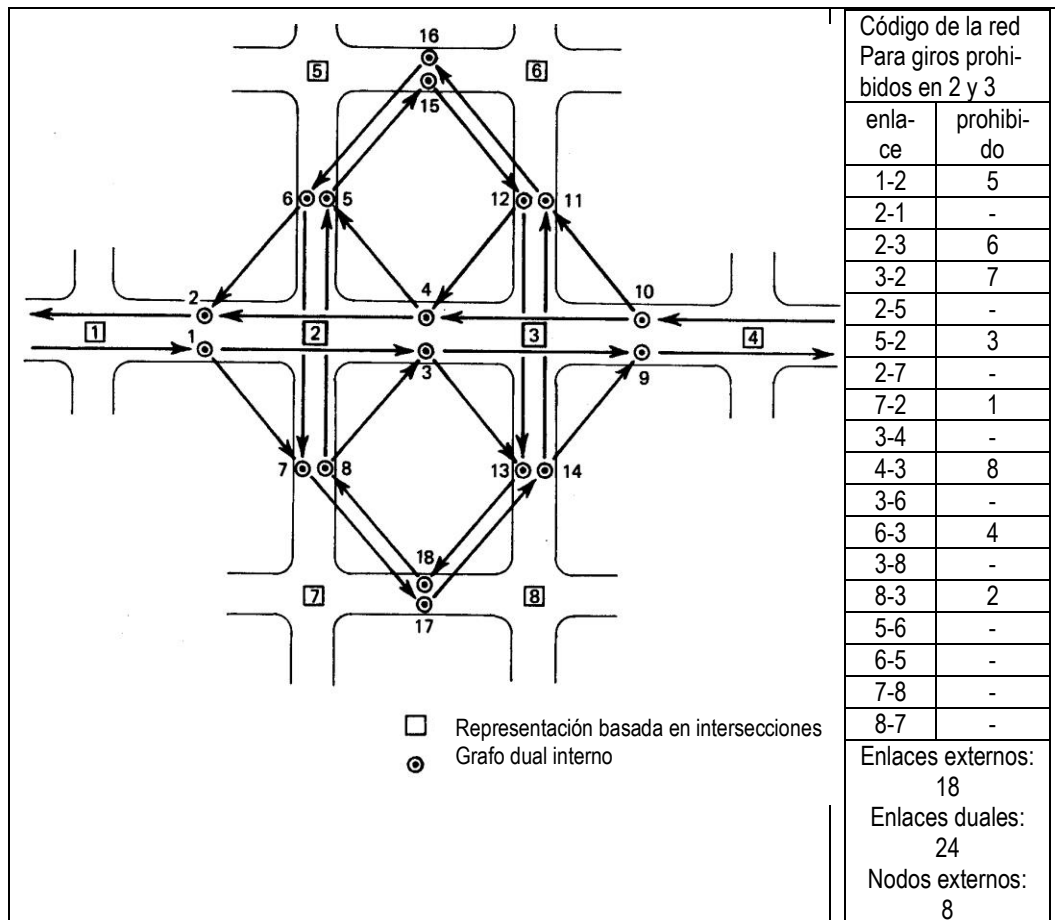


El verdadero problema es que la red no está siendo convertida a un grafo de la manera más conveniente. El método convencional representa los segmentos de vía como enlaces y las intersecciones como nodos, lo cual puede denominarse como una representación *basada en intersecciones*. En de la Barra y Pérez (1986) se persigue un enfoque diferente llamado el *grafo dual*. La Figura 7-6 muestra la forma en que se representa la misma red con el método propuesto, con los mismos giros prohibidos a la izquierda en las intersecciones 2 y 3. En el código de la red cada segmento de vía se representa de la manera convencional con nodos en las intersecciones, excepto que esta vez no hay nodos expandidos y las prohibiciones se especifican para cada arco simplemente con el nodo al cual no se puede girar. Por ejemplo, el arco 1-2 no puede girar a 5. Como puede verse, el número de nodos y enlaces en el código de red permanece igual al original de la Figura 7-3 donde no hay giros prohibidos. Las prohibiciones se especifican de manera muy sencilla, sin enlaces y nodos ficticios.

Cuando el código de la red entra al algoritmo de construcción de pasos, la red es revertida y se construye el grafo dual, donde ahora los arcos se transforman en los nodos del grafo dual y los arcos duales representan la conectividad. Cada arco del grafo dual representa una conexión permitida entre un segmento de vía de origen y uno de destino. Se define como conexión permitida una que no esté explícitamente en la lista de prohibiciones. El resto del algoritmo de búsqueda de pasos permanece inalterado, excepto que trabaja sobre el grafo dual en lugar del original externo. Si se aplican las etapas (a) a (d) al grafo dual con la prohibición, el paso resultante va a ser 1-3-13-18-8-5 en la Figura 7-6. Es evidente que el algoritmo no tendrá problema alguno para encontrar este paso porque no se repite ningún nodo dual. El algoritmo luego puede traducir los resultados en el código externo. Para el usuario el paso encontrado será 1-2-3-8-7-2-5 donde se repite el nodo 2. Un bucle (*loop*) no es posible porque implica repetir enlaces duales.

En el caso del transporte público las prohibiciones de giro pueden aplicar a los vehículos pero no a los pasajeros, porque pueden hacer un trasbordo de un vehículo a otro, ante lo cual el algoritmo deberá sumar una posible tarifa de trasbordo y un tiempo de espera.

Figura 7-6: Grafo dual para representar una red de transporte



7.3.5 Búsqueda multi-pasos

El algoritmo de búsqueda de pasos debe ser visto como la construcción analítica de las opciones de transporte de que disponen los usuarios. Desde este punto de vista, resulta evidente que los usuarios no considerarán una sola opción, sino múltiples. Esto significa que el algoritmo de construcción de pasos debe determinar los n primeros pasos en lugar de uno sólo de menor costo, donde n es un valor dado.

La forma de modificar el algoritmo descrito para que considere n opciones es cuestión de agregar los subíndices respectivos, agregando otra dimensión al vector de costos y de ante-arcos y rutas, requiriéndose n etiquetas. Aparte del incremento en el número de dimensiones, el resto del algoritmo permanece inalterado.

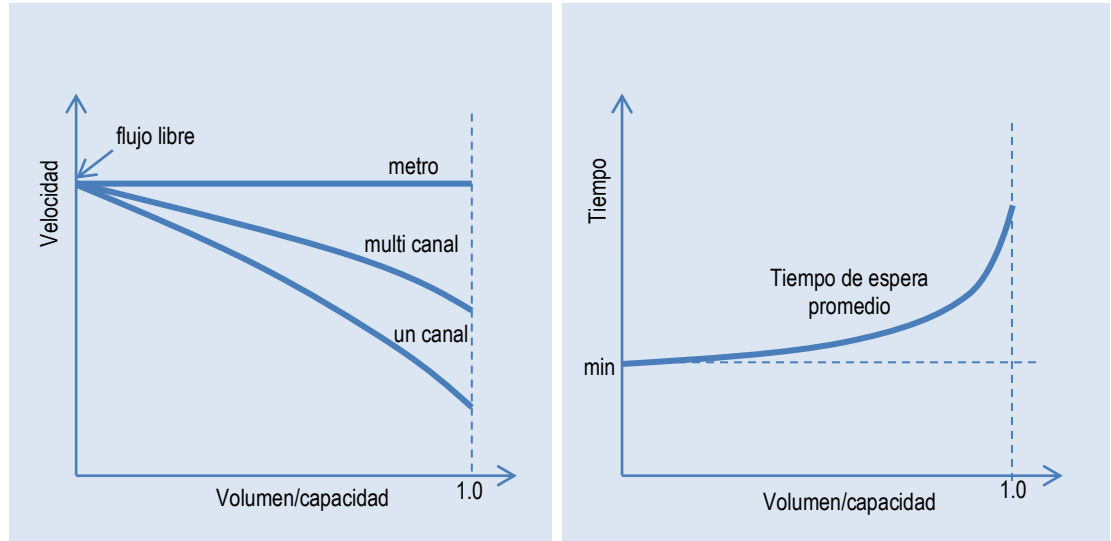
7.4 Restricción de capacidad

En las secciones anteriores se describió que el cálculo del costo de viaje era un componente fundamental para estimar las opciones de viaje de los usuarios. El costo percibido por los usuarios, se mencionó, tiene diversos componentes, entre ellos el tiempo de viaje y el tiempo de espera. En la primera iteración del modelo se asume que la red está vacía, y por lo tanto las velocidades de circulación en los enlaces es la *velocidad a flujo libre*.

Una vez estimados los costos a flujo libre, el modelo calcula la demanda, la separa por modos y finalmente la asigna a los pasos. En este punto la demanda debe ser confrontada con la capacidad de la oferta en cada enlace a lo largo de los pasos, incrementando el tiempo de viaje. La forma en que se incrementa el tiempo de viaje depende de una serie de factores, principalmente las características del enlace y de los vehículos.

La Figura 7-7(a) muestra el efecto que tiene el incremento en el volumen de vehículos a lo largo de un enlace para distintos tipos de vía. La velocidad a lo largo de una vía multi-canal se mantiene relativamente fija hasta que se acerca al límite cuando el volumen es igual a la capacidad. En una carretera de un canal la velocidad, debido a la interferencia de los vehículos, se reduce más rápidamente. Los vehículos en una línea de metro (trenes) no reducen su velocidad porque el número de vehículos es fijo.

En el caso del transporte público, además de la reducción de la velocidad en las vías, los usuarios sufren otro efecto: el tiempo de espera, que se incrementa en la medida que el número de usuarios se acerca a la capacidad del servicio ofertado. Esto se muestra en la Figura 7-7(b)

Figura 7-7: Reducción de velocidad e incremento del tiempo de espera

7.5 Generación de viajes

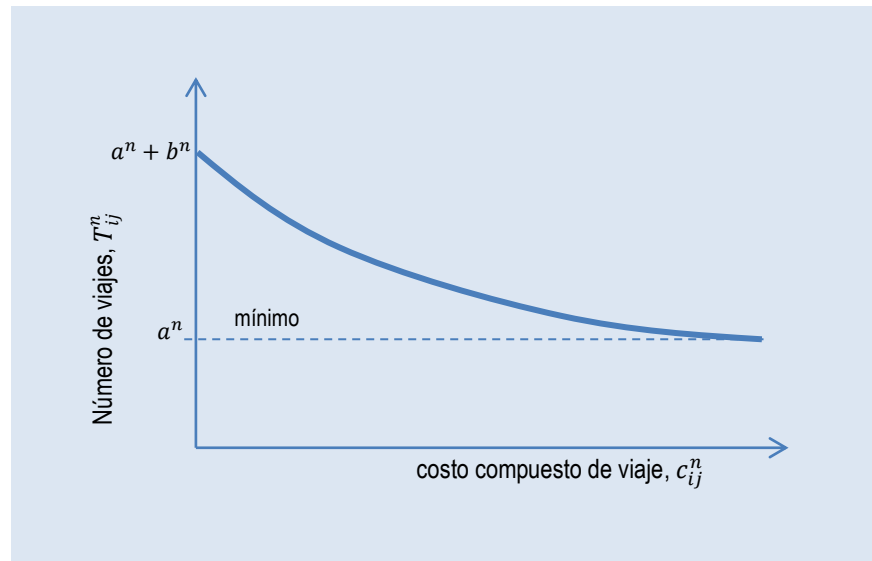
En la sección 7.2, cuando se describió el modelo integrado de usos del suelo y transporte, la generación de viajes fue descrita como una de las dos interfaces importantes entre el transporte y las actividades, siendo la otra los costos generalizados de transporte. Se argumentó que el modelo ideal de generación de viajes es una función que transforma los flujos funcionales del modelo de actividades en viajes, tomando en consideración el costo generalizado de viaje. En otras palabras, debe ser considerada como una función elástica como la indicada en la Figura 7-8.

Como puede verse, la función de demanda de viajes es similar a la curva de demanda de espacio construido en la Figura 6-3 de tal manera que no hay razón para adoptar una forma diferente a la ecuación (6-2), que en este caso es:

$$T_{ij}^n = x_{ij}^n [a^n + b^n \exp(-\beta^n c_{ij}^n)] \quad (7-2)$$

donde T_{ij}^n es el número de viajes generados por la categoría n entre i y j y x_{ij}^n es el flujo funcional producido por el modelo de actividades. El parámetro a^n es el número mínimo de viajes, y $a^n + b^n$ es el máximo. El número de viajes decae exponencialmente a medida que el costo compuesto de viajes se incrementa, con una pendiente regulada por β^n .

Figura 7-8: Elasticidad en la generación de viajes



La elasticidad en la generación de viajes es de gran importancia en la predicción de la demanda de viajes. Cualquier facilidad nueva que se introduzca en el sistema de transporte, con muy pocas excepciones, *inducirá* una cierta cantidad de viajes adicionales. Por ejemplo, la introducción de una línea de metro de 13 Km en Caracas incrementó el número de viajes en el corredor respectivo en 160% en el pico de la mañana. Lo opuesto también es frecuente: los planificadores pueden estimar que el tráfico a lo largo de una carretera de baja capacidad se incrementará en tres veces en 20 años, lo cual puede no ocurrir debido a que la poca capacidad de la vía inhibe la generación de viajes. Otro buen ejemplo fue la inauguración del tramo de autopista que completó el anillo alrededor de Londres llamado M25. Los planificadores predijeron que esta vía de gran capacidad iba a extraer tráfico del centro de la ciudad, y que llevaría dos o tres décadas para que la demanda congestionara la vía. Sorprendentemente la vía sólo tardó 15 días en llegar a niveles alarmantes de congestión, y nadie notó alivio alguno en el centro, lo cual fue tema de debate en la prensa local. Este grave error de cálculo de los planificadores ocurrió porque no consideraron la elasticidad en la generación de viajes, especialmente en un área en que la nueva capacidad sería copada rápidamente por demanda que anteriormente estaba reprimida. ¡Lástima que no tuvieran un modelo elástico como el de la ecuación (7-2)!

A pesar de las importantes implicaciones de la elasticidad en la generación de viajes, resulta sorprendente que la gran mayoría de los modelos de transporte lo ignoren totalmente. Una posible excepción fue el modelo de Echenique, Gerald y Williams (1977), en donde el tema de la generación elástica se resolvió en el modelo de actividades. Los hogares equilibraban una ecuación presupuestaria tipo Alonso con los clásicos tres elementos: suelo, transporte y todos los demás consumos. De allí se calculaba la cantidad de dinero que los hogares estaban dispuestos a gastar en transporte, información que el modelo de transporte convertía en viajes. Esta solución es sin duda elegante, pero difícil de estimar en la práctica con base en la información dispo-

nible. El problema es que el número de viajes no sólo varía en función de los ingresos de los viajeros y su localización, sino que varía considerablemente en las horas del día. La elasticidad para los viajes realizados en 24 horas es generalmente menor que la de la hora pico. En el ejemplo de Caracas citado anteriormente, muchos de los viajes en hora pico inducidos por la nueva línea de metro se realizaban antes o después de la hora pico. El otro problema es que en el caso de las mercancías no hay ecuación presupuestaria a considerar.

7.6 Reparto modal

En general, la modelación de transporte se caracteriza por utilizar una gran variedad de enfoques teóricos y herramientas de análisis. En el caso del reparto modal, sin embargo, la mayoría está de acuerdo en que la mejor opción para representar el reparto modal es el modelo multinomial logit (MNL). En éste y en capítulos previos se ha argumentado que el modelo logit no sólo es apropiado para la representación del reparto modal sino en todos los eslabones de una cadena de decisiones, desde localización de actividades hasta la asignación de vehículos en la red de transporte. De hecho, hemos utilizado aquí el reparto modal como ejemplo típico de una típica elección.

El modelo general basado en teoría de utilidad aleatoria de la ecuación (4-10) aplica directamente al problema del reparto modal, que en este caso adopta la forma:

$$T_{ij}^{nk} = T_{ij}^n \frac{\exp(\beta^n c_{ij}^{nk})}{\sum_k \exp(\beta^n c_{ij}^{nk})}, \forall k \in K^n \quad (7-3)$$

La expresión $\forall k \in K^n$ indica que la suma es sobre todos los modos k que pertenecen al conjunto de modos disponibles a la categoría n , K^n . En el caso de las mercancías, K^n está limitada a modos de carga, como camiones y ferrocarriles. En el caso de los pasajeros, sin embargo, se plantea el tema de la disponibilidad de automóvil por parte de los usuarios, lo cual está bien cubierto en Supernak (1983). Cada categoría de pasajero tendrá una tasa de propiedad vehicular específica. La proporción que no es propietaria de vehículo particular es asignada directamente a los modos públicos, mientras que los que sí lo son, pasan por la etapa de reparto modal.

La *disponibilidad* de vehículo, como argumenta Supernak, es un concepto más adecuado que el de propiedad. Es común que, aún si las personas no son propietarias de un vehículo, tengan uno disponible, como el caso de los automóviles de empresa. También es común que en el hogar haya un automóvil que lo utiliza uno de sus miembros, y deja a los demás sin disponibilidad, así como hay casos en que hay más de un automóvil en el hogar.

Muchos autores plantean que el modelo de reparto modal de la ecuación (7-3) puede conducir a errores debido a la correlación de atributos entre las opciones. El ejemplo clásico en la literatura es la paradoja del bus-rojo-bus-azul (Mayberry, 1970), que se puede explicar de la siguiente manera. Supongamos un caso simple en el cual para viajar de un origen a un destino hay dos modos disponibles: $k=1$ auto y $k=2$ bus. Para simplificar vamos a suponer que ambos tienen costos y tiempos similares, tal que los

usuarios son indiferentes, con lo cual la ecuación (7-3) producirá como resultado una proporción igual en cada opción con probabilidades de $\frac{1}{2}$ para cada una. Ahora, si la mitad de los buses son pintados de rojo y la otra mitad de azul, para el modelo de reparto modal hay ahora tres modos: $k=1$ auto, $k=2$ bus rojo y $k=3$ bus azul. Como los usuarios seguirán percibiendo la misma utilidad de cada opción, las probabilidades serán ahora $1/3$ en cada caso.

Esta es, obviamente, una falacia, porque el color no debería tener efecto alguno sobre el comportamiento de los usuarios. La solución propuesta por Williams (1977a, b) es el organizar el problema de manera jerárquica, ya que los usuarios considerarán a los dos autobuses como opciones cercanas altamente correlacionadas. En este caso, la probabilidad de escoger buses azules será la probabilidad de elegir entre autobuses de cualquier color y el automóvil, multiplicada por la probabilidad de escoger entre buses azules sobre los rojos, esto es, $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$, que es el resultado correcto.

La solución dada en la sección 7.3 es equivalente a la propuesta por Williams, ya que varios tipos de autobús fueron incluidos en una única red de transporte público. En este caso el segundo nivel jerárquico está incorporado al modelo de búsqueda de pasos y asignación.

7.7 Asignación a rutas

La asignación de viajes es el proceso mediante el cual las matrices de viaje por modo y tipo de usuario T_{ij}^{nk} son transformadas en el número de viajes en cada enlace de la red de transporte. Para lograr esto, Wardrop (1952) identificó dos criterios entre los cuales se pueden basar los métodos de asignación:

- El primer criterio está basado en el *tiempo de viaje promedio*, y asume que los usuarios son egoístas, considerando sólo sus propios tiempos de viaje para tomar las decisiones de viaje en la red.
- El segundo criterio está basado en el concepto de *tiempo marginal de viaje*, y asume que los usuarios están conscientes de la forma en que sus propias decisiones afectan el tiempo total del sistema.

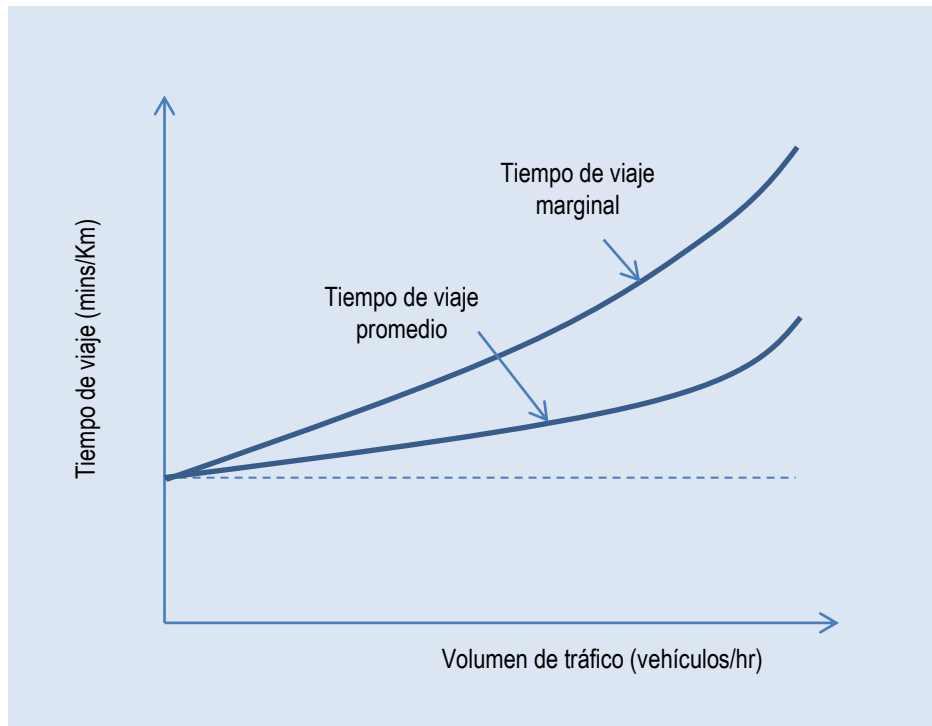
En la Figura 7-9 se representan el tiempo de viaje promedio y marginal. El tiempo promedio es el que de hecho perciben los usuarios, y tenderá a crecer a medida que el volumen de tráfico a lo largo de un enlace se incrementa. El tiempo de viaje marginal es el incremento del tiempo agregado cuando un nuevo usuario se une al flujo.

Si suponemos que prevalece el primer principio, el método puede denominarse como de *óptimo al usuario*. Si, en cambio, prevalece el segundo principio, el método de asignación pasaría a denominarse de *optimización del sistema*. Este segundo método llevará a un costo total menor para todo el sistema, mientras el primer método será más realista. Se argumenta que la realidad yace entre estos dos extremos en algún punto intermedio. También se puede argumentar que una asignación basada en utilidad aleatoria producirá resultados que están a mitad de camino entre la optimización al usuario y al sistema. También se puede argumentar que los dos métodos pueden

ser útiles: primero se hace el análisis suponiendo optimización del sistema y luego se diseñan políticas para que los usuarios individuales se acerquen a dicho óptimo.

Las diferentes técnicas de asignación que se encuentran en la literatura varían considerablemente, desde los más simples hasta los de alta complejidad, a la par en que la capacidad de computación también ha evolucionado. En las secciones siguientes se revisan los principales métodos.

Figura 7-9: Tiempo de viaje promedio y marginal



7.7.1 Asignación a paso único

Esta es la solución más simple y costo-efectiva. El método consiste en buscar el camino de menor costo entre un origen y un destino, y luego asignar todos los viajes a ese único camino en un procedimiento *todo-o-nada*. El método cae claramente dentro del primer principio de Wardrop. Es fácil imaginar que si este método se aplica a una red densa, los resultados serán poco realistas porque sólo recibirán flujo los enlaces que pertenecen a los caminos mínimos, tendiendo a sobrecargarlos. Por estas razones, este método prácticamente no se utiliza hoy en día.

7.7.2 Asignación incremental

La asignación incremental representa un primer esfuerzo por resolver algunos de los problemas de la asignación todo-o-nada, introduciendo un procedimiento de restricción de capacidad. También cae dentro del primer criterio de Wardrop. El método

procede iterativamente. En la primera iteración se estiman costos y tiempos a red vacía como base para calcular un conjunto de pasos mínimos entre pares origen-destino. Luego se asigna una pequeña proporción de los viajes totales, por ejemplo, 30%, a estos caminos mínimos todo-o-nada. Los tiempos de viaje son re-estimados con el procedimiento de restricción de capacidad, con lo cual se inicia una segunda búsqueda de caminos mínimos. En esta segunda iteración se asigna una proporción aún menor de los viajes, por ejemplo, 20%, con lo cual se vuelve a calcular los tiempos en el procedimiento de restricción de capacidad. Esto se repite hasta que se haya asignado el 100% de los viajes.

Este método, que está incluido en muchos software de modelación de transporte, como por ejemplo el UTPS (UMTA, 1977), tiene la virtud de combinar la restricción de capacidad con la eficiencia computacional del todo-o-nada. Sin embargo conserva algunos de los problemas de su predecesor y agrega algunos propios. El primer problema es que el método carece de una base heurística, ya que los usuarios en la realidad no toman sus decisiones de manera incremental. Los incrementos son simplemente atisbos inventados sin una base teórica. El segundo problema es que si la red no está muy congestionada, como en ciudades pequeñas o redes regionales, los resultados del incremental tenderán a parecerse mucho a los del todo-o-nada, ya que el conjunto de caminos mínimos puede ser el mismo en todas las iteraciones. Desde un punto de vista teórico, este método supone que los usuarios siempre prefieren el camino de menor costo, y que sólo se separarán de él por causa de la congestión. En el Capítulo 4, al discutir la teoría de utilidad aleatoria, se demostró que los usuarios se dispersan alrededor del paso mínimo debido, principalmente, al procedimiento de agregación. De hecho la asignación incremental suele dejar muchos enlaces sin tráfico porque no lograron entrar en ningún camino.

7.7.3 Asignación por equilibrio

Este método está basado en el principio que los usuarios escogerán entre caminos alternativos de tal manera que, en equilibrio, ningún usuario podrá mejorar su utilidad si cambia de escogencia. En consecuencia, el primer principio de Wardrop está en el corazón del método. El equilibrio se encuentra cuando todos los usuarios están, individualmente, en sus respectivos pasos de mínimo costo, lo cual implica, además, que todos están percibiendo el mismo costo, cualquiera sea la opción que elija. Una buena descripción de este método está en Kanafani (1983).

Supongamos, por simplicidad, que sólo hay dos pasos que conectan un origen con un destino. Para cada una de estas rutas, la restricción de capacidad impone un costo creciente a medida que los usuarios deciden utilizar ese paso. La Figura 7-10 muestra la forma en que crecen las curvas de costo a medida que el flujo de vehículos se incrementa. Las dos funciones de costo están representadas una de izquierda a derecha y la otra en sentido contrario, y el eje horizontal representa el número total de viajes a asignar. Las dos curvas se cortan en el punto E donde el costo percibido en los dos pasos es igual. En cualquier otro punto habrá usuarios que se beneficiarían si se cambian de camino. El problema puede formularse en términos de programación matemática al establecer el área debajo de las dos curvas (área sombreada) como una función objetivo a minimizar.

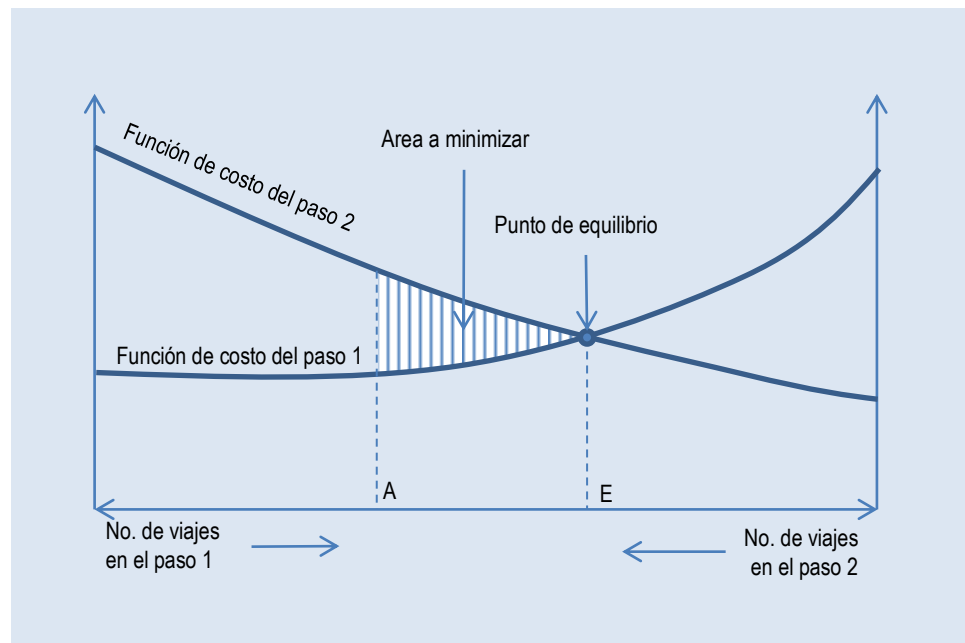
Le Blanc, Morlok y Pierskalla (1975) desarrollaron un algoritmo que puede resolver el problema de la asignación por equilibrio en redes de gran tamaño de manera eficiente. El método procede de manera iterativa en las siguientes etapas:

- Asumir una distribución inicial de los viajes a los pasos y cada enlace de la red para computar los costos correspondientes.
- Con estos costos encontrar los pasos mínimos
- Asignar todos los viajes a los pasos mínimos
- Calcular el promedio ponderado entre la asignación original en a) y la obtenida en c). Los pesos se obtienen heurísticamente para minimizar el área bajo la función objetivo.

El cálculo regresa a la etapa a) donde las estimaciones iniciales se reemplazan por los resultados de la etapa c). Los autores demuestran que el algoritmo converge de manera eficiente a condición que las funciones de costo sean convexas.

La asignación por equilibrio está disponible en muchos software como el UTPS (UMTA, 1977). Este método puede ser criticado desde dos puntos de vista. Desde el punto de vista teórico supone optimización del costo promedio al usuario, que se ha demostrado como poco realista. Como resultado, si la red no está muy congestionada, el algoritmo tiende a sobrecargar las vías principales y subestimar las vías menores, un comportamiento similar al método incremental. Desde un punto de vista práctico, como se discutió en la Sección 7.3, las curvas de costo no siempre son convexas.

Figura 7-10: Funciones de costo en el algoritmo de asignación por equilibrio



7.7.4 Selección probabilística de pasos

El principio básico de este método es que el flujo de viajeros no escogerá siempre el camino de menor costo, sino que se distribuirán entre los pasos alternativos. Uno de los esfuerzos más tempranos y pioneros en este sentido fue el trabajo de McLaughlin (1966) que propuso un algoritmo de asignación multi-pasos con restricción de capacidad, basado en *enumeración de pasos*. El procedimiento no carga todo el tráfico en el paso mínimo, sino que los distribuye entre los primeros n -pasos. El cálculo sigue las siguientes etapas:

- Computar todos los pasos entre un origen y un destino que tienen costos menores que un múltiplo P del paso de menor costo, $P > 1$.
- Para cada par origen-destino, construir un sub-grafo en el cual cada arco corresponda a uno de los pasos candidatos
- Usar teoría de grafos lineales para determinar los flujos en cada arco del sub-grafo. Cada paso alternativo recibirá un flujo inversamente proporcional a su impedancia.
- Aplicar un procedimiento de restricción de capacidad a cada enlace para estimar las velocidades restringidas, y volver a la etapa a) a no ser que se haya alcanzado la convergencia.

Como puede verse, este intento temprano para desarrollar una asignación probabilística multi-paso es acorde con los principios propuestos en la Sección 7.3. El algoritmo, sin embargo, se enfrentó a numerosos problemas operativos, que se debían probablemente al hecho que en aquella época la capacidad de computación y almacenamiento de datos era muy limitada, y que aún no se contaba con algoritmos de búsqueda de pasos muy eficientes.

Dial (1971) vino al rescate con un artículo sugestivamente titulado '*Un modelo de asignación probabilístico multi-paso que evita la enumeración de los caminos*'. El algoritmo fue desarrollado para poder trabajar con redes de gran tamaño de manera económica, y está disponible en algunos paquetes de software de transporte como el UTPS (UMTA, 1977).

El algoritmo procede de la manera que se describe a continuación. Considérese el ejemplo de la Figura 7-11(a) en que 100 viajes van del centroide 1 al 2. En la red hay otros nodos de 3 hasta 9. Se ha utilizado un algoritmo de paso mínimo para calcular el costo desde cada nodo al destino 2. Luego, al contrario del algoritmo de búsqueda de pasos mínimos descrita anteriormente en la Sección 7.3, aquí se procede en sentido hacia el destino.

Vamos a designar $c(n,2)$ al costo mínimo de viaje desde cualquier nodo n hasta el destino final 2. El algoritmo comienza por considerar todos los nodos que están conectados al nodo de origen 1. Todos los enlaces conectados al nodo 1 son considerados como candidatos potenciales, pero la siguiente condición es impuesta para que un nodo candidato sea aceptado:

$$c(n,2) \leq c(i,2) \quad (7-4)$$

donde n es el candidato e i el nodo de origen. La condición (7-4) puede llamarse *de acercamiento*, porque establece que el nodo n es un candidato aceptable si está más cerca del destino final. En el ejemplo, hay tres posibles candidatos desde el nodo de origen 1: 1-4, 1-5 y 1-6. El candidato 1-3 no es aceptable porque el costo de viajar de 3 a 2 es 3,5 mientras el costo de viajar de 1 a 2 es 2,5.

Una vez se ha determinado los candidatos aceptables, se les asigna probabilísticamente el tráfico, en este caso los 100 viajes, etiquetando a los candidatos con la cuota de viajes respectiva. Para el cálculo de las probabilidades lo ideal es utilizar un multinomial logit, pero en este ejemplo se ha utilizado una probabilidad simple para que el lector pueda seguir y verificar el procedimiento. La siguiente tabla muestra la forma en que se distribuyen los 100 viajes entre los tres candidatos aceptados, con sus costos y probabilidades.

Candidato	Costos	Probabilidades	Asignación
4	$c(4,2)+c(1,4)=3,5$	$3,5^{-1} / 1,019=0.28$	$\times 100 = 28$
5	$c(5,2)+c(1,5)=3,0$	$3,0^{-1} / 1,019=0.33$	$\times 100 = 33$
6	$c(6,2)+c(1,6)=2,5$	$2,5^{-1} / 1,019=0.39$	$\times 100 = 39$
		$3,5^{-1}+3,0^{-1}+2,5^{-1}=1,019$	Total = 100

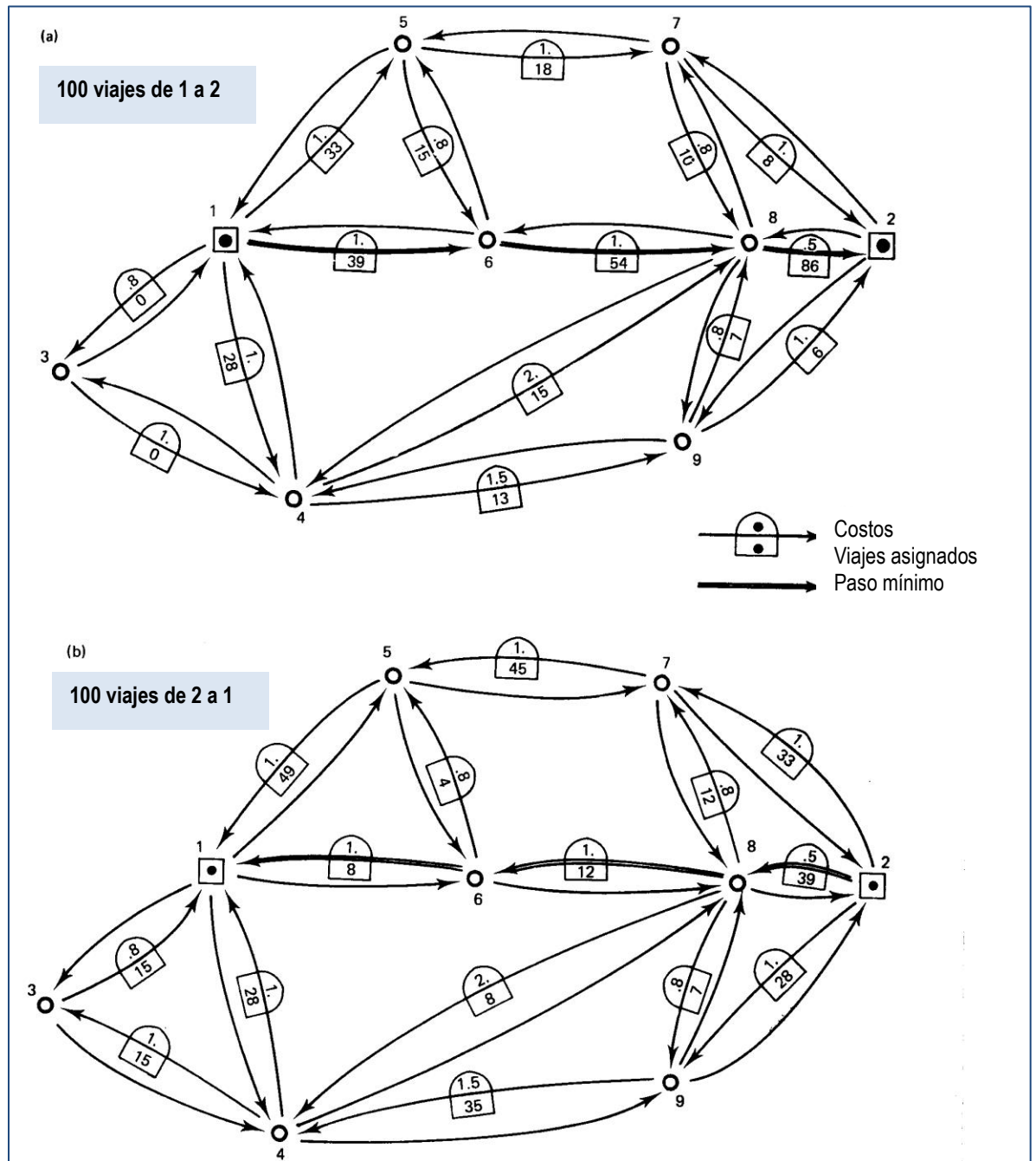
Cada candidato es considerado como el origen. Por ejemplo, el nodo 5 con una etiqueta de 33 viajes, tiene dos candidatos aceptables: 6 y 7. El procedimiento se repite hasta que se llega al destino final 2.

El mayor atractivo de este método es su eficiencia computacional, a pesar del hecho que está haciendo asignación probabilística multi-paso. Sin embargo tiene algunos problemas importantes, siendo el mayor de ellos el de la asignación asimétrica. Para entender este problema, considérese el caso opuesto al descrito arriba, esto es, 100 viajes que van en sentido contrario desde 2 hasta 1. El procedimiento descrito se aplicó por igual a este caso, con los resultados que se muestran en la Figura 7-11(b).

Cuando se comparan las dos figuras resulta inmediatamente evidente que los resultados, que deberían ser iguales en ambos sentidos dado que la red es perfectamente simétrica, muestran diferencias importantes. Sólo dos enlaces muestran el mismo resultado en ambos sentidos (1-4 y 9-8), dos arcos muestran flujo cero en (a) (1-3 y 3-4) y el resto de los enlaces muestran diferencias que van desde -77,8% hasta 366,7%.

De estos resultados resulta claro que el algoritmo tiene serias dificultades. No hay ninguna razón para que los usuarios tomen decisiones tan diferentes al viajar en sentidos opuestos, dada una red perfectamente simétrica. Las únicas fuentes de asimetría aceptables son asimetrías en las matrices de demanda o en las características de los enlaces. Es fácil demostrar que tal comportamiento asimétrico no existe en la realidad, y que las asimetrías que se observan en los resultados provienen de la lógica del algoritmo, no de consideraciones de comportamiento.

Figura 7-11: Un ejemplo del algoritmo de asignación de Dial



En de la Barra y Pérez (1986) se demuestra que la principal fuente de asimetría en el algoritmo de Dial es la condición de aproximación (7-4), ya que no es independiente de la topología de la red, pero esta condición no puede ser removida del algoritmo. También se demuestra que un algoritmo similar al de McLaughlin (1966), con la metodología mejorada de búsqueda de pasos presentada en la Sección 7.3, puede ser a

la vez eficiente y generar resultados perfectamente simétricos. La forma final del algoritmo propuesto es:

- (a) Computar los primeros n pasos que conectan cada par origen-destino, modo y tipo de usuario, almacenando los ante-nodos y ante-modos
- (b) Asignar los viajes a los n pasos con un modelo de asignación multinomial logit de la forma que se indica más abajo
- (c) Una vez procesados todos los pares origen-destino, aplicar restricción de capacidad en todos los enlaces para estimar las velocidades reducidas por la congestión
- (d) Terminar si se ha llegado a la convergencia, o de lo contrario regresar a la etapa (a)

La forma del modelo probabilístico en la etapa (b) será:

$$T_{ij}^{nkp} = T_{ij}^{nk} \frac{\exp(-\beta^n c_{ij}^{nkp})}{\sum_p \exp(-\beta^n c_{ij}^{nkp})} \quad (7-5)$$

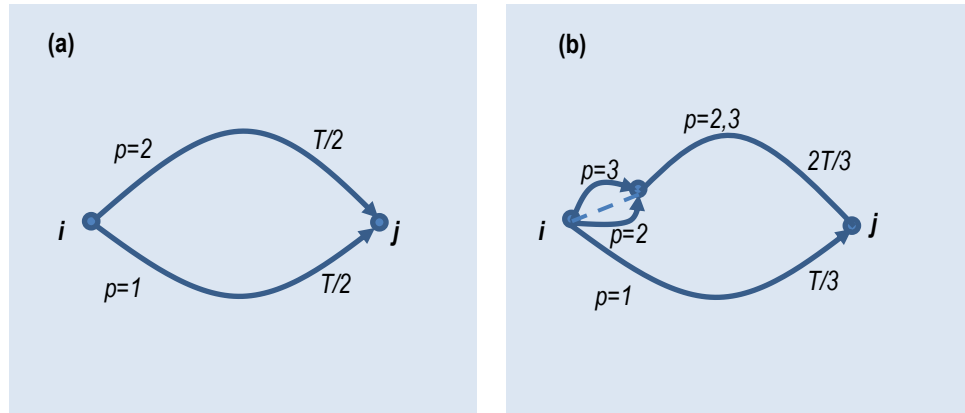
El algoritmo propuesto cumple con algunos requerimientos importantes. Aparte de sus condiciones simétricas, puede ser aplicado a transporte de mercancías o de personas, y en este último caso, tanto para el automóvil como para los modos de transporte público, representando adecuadamente las transferencias entre modos, tiempos de espera, giros prohibidos y otros factores. Está, sin embargo, sujeto a la crítica general en contra de los modelos multinomiales logit relacionada con la correlación de atributos entre las opciones.

La correlación de atributos en los modelos logit de asignación puede ilustrarse con otro ejemplo, similar a la paradoja de los autobuses rojos y azules, esta vez denominado el '*hueco en la vía*' que se describe en la Figura 7-12. En (a) se presenta un caso de un nodo i conectado a un nodo j con dos pasos alternativos $p=1$ y $p=2$, que por simplicidad supondremos de igual costo. En este caso el modelo de asignación de la ecuación (7-5) estimará que los viajeros serán indiferentes ante las dos opciones, y si T es el número total de viajes entre i y j , entonces cada paso tendrá un volumen asignado de $T/2$. Un día una de las vías presenta un hueco, y para su reparación las autoridades preparan dos desvíos, como se indica en la Figura 7-12(b). Para el modelo logit, ahora habrá tres pasos ($p=1, 2, 3$), y si los desvíos son pequeños, podemos suponer que los costos seguirán siendo muy parecidos. En consecuencia, las probabilidades serán ahora de $T/3$ en cada caso, con lo cual la vía dañada aumenta la captación de demanda a $2T/3$, un resultado claramente absurdo.

El problema es que los pasos 2 y 3 están altamente correlacionados, y son considerados por los viajeros como si fueran una sola opción. Para ser consistentes con la teoría de utilidad aleatoria, el modelo de asignación deberá organizarse de manera jerárquica. La red deberá codificarse reconociendo al menos dos niveles jerárquicos. En el primer nivel habrá sólo dos opciones y en ambos casos las probabilidades serían idénticas $=T/2$. En el segundo nivel jerárquico uno de los pasos tendría dos sub-opciones con probabilidades de $T/4$.

Este es otro ejemplo en que la estructuración jerárquica de los modelos resuelve el problema de la correlación de atributos en los modelos logit. En el caso de la asignación, sin embargo, esta solución no está aún disponible, y permanece como un área de investigación y desarrollo de gran potencial. Por los momentos, el analista deberá ser muy cuidadoso al codificar la red para evitar este tipo de problemas.⁴

Figura 7-12: Ejemplo del hueco en la vía para ilustrar el problema de correlación de atributos en el modelo de asignación



7.8 Costos compuestos y el excedente al consumidor

El último punto a tratar es la forma exacta en que deben ser agregados los costos para construir el costo compuesto. Se trata de aplicar la ecuación (4-11) a cada uno de los eslabones de la cadena de decisiones, como se explicó en la Sección 7.2 al describir la estructura general del modelo integrado de usos del suelo y transporte.

La regla es que los costos compuestos deben ser computados siguiendo la cadena de decisiones aguas arriba. En este caso el cálculo debe comenzar con el costo a nivel de paso, luego a nivel de modo y finalmente para cada par origen-destino y categoría de usuario. El cálculo de los costos a nivel de pasos ya fue explicado en la Sección 7.3, generando un conjunto de matrices c_{ij}^{nkp} . Este costo debe ser agregado con respecto a los pasos para obtener el costo compuesto de viajar del origen i al destino j por el modo k :

$$c_{ij}^{nk} = \frac{1}{-\beta^n} \ln \left[\sum_p \exp(-\beta^n c_{ij}^{nkp}) \right] \quad (7-6)$$

⁴ NdT: Este problema ya fue resuelto por el autor hace bastante tiempo.

en donde β^n es el parámetro de asignación de la ecuación (7-5). Los c_{ij}^{nk} resultantes son utilizados en el modelo de separación modal de la ecuación (7-3). La etapa siguiente es agregar estos costos sobre todos los modos para obtener el costo compuesto de viaje entre zonas por tipo de usuario c_{ij}^n :

$$c_{ij}^n = \frac{1}{-\beta^n} \ln \left[\sum_k \exp(-\beta^n c_{ij}^{nk}) \right] \quad (7-7)$$

donde ahora β^n es el parámetro de la ecuación (7-3). Los valores resultantes se utilizarán en el modelo elástico de generación de viajes y eventualmente en el modelo de actividades del Capítulo 6. También servirán como indicador general de accesibilidad para cada tipo de usuario.

En este punto se puede introducir el indicador de beneficio o excedente al consumidor de la ecuación (4-12), que debe ser evaluado al nivel más alto de la cadena de transporte, correspondiente al reparto modal. En este caso será:

$$\Delta S_{ij}^n = \frac{1}{-\beta^n} \ln \left[\frac{\sum_k T_{ij}^{nk} \exp(-\beta^n c_{ij}^{nk}) \bar{B}}{\sum_k T_{ij}^{nk} \exp(-\beta^n c_{ij}^{nk}) \bar{A}} \right] \quad (7-8)$$

en donde $\bar{B}$ es el escenario a evaluar y $\bar{A}$ es el caso base que sirve de comparación. Nótese que se ha incluido T_{ij}^{nk} en la formulación para llevar cuenta del número de viajes en cada escenario que pueden ser distintos según el modelo de generación elástico. Los beneficios totales del escenario $\bar{B}$ será la suma $\sum_{ijn} S_{ij}^n$.

7.9 Conclusiones

En este capítulo se describieron los principales componentes del sistema de transporte y su modelación integrada al sistema de actividades. El tema es muy extenso y la literatura abundante, de tal manera que aquí se ha limitado principalmente a los modelos propuestos. Las primeras dos secciones se dedicaron a las relaciones entre el transporte y el sistema de actividades, explicando como una estructura enlazada debe transformarse en una verdaderamente integrada, donde las variables de los modelos de actividades y las de transporte dependan mutuamente. También se argumentó que el sistema de transporte no puede ser representado adecuadamente sin la integración con el sistema de actividades, especialmente si se buscan proyecciones a largo plazo. Por otra parte se argumentó que si se quiere que una representación detallada de la economía espacial de una región o ciudad sea verdaderamente útil, debe ir acompañada de una descripción igualmente detallada del sistema de transporte.

La tercera sección se dedicó al análisis de redes, y en particular a la búsqueda de pasos. Las redes de transporte se representan como redes direccionales en la mayoría de los modelos de transporte, y en esta sección se demostró que la representación con base en intersecciones no es el modelo más adecuado. En su lugar se propuso una representación basada en arcos, denominada grafo dual, que resuelve muchos problemas, en particular el de los giros prohibidos, a la vez que mejora la eficiencia. También se enfatizó que la búsqueda de caminos no debe separarse de la asignación.

El resto del capítulo se dedicó a otros elementos clave del sistema de transporte, como la restricción de capacidad, generación de viajes, separación modal, asignación y la estimación de los costos compuestos y los excedentes a los usuarios de transporte.

De este análisis se desprenden dos conclusiones principales. La primera se refiere a la consistencia teórica con que deben tratarse los procesos de elección entre opciones. Por esta razón tanto la separación modal como la asignación fueron representados como modelos de elección discretos, derivándose los modelos multinomiales logit respectivos. Si esta consistencia no se logra, será imposible computar los costos compuestos como se argumenta en el Capítulo 4. El otro aspecto se refiere a la elasticidad en la generación de viajes, argumentando que el número de viajes que se realizan son una función de los costos compuestos. Estos dos importantes elementos han sido ampliamente reconocidos en la literatura, pero han sido ignorados por la mayoría de los modelos de transporte actuales, lo cual hace que un gran número de análisis de demanda de transporte estén sobre bases poco realistas. Se presentaron ejemplos concretos para demostrar este punto, y en el próximo y último capítulo se presentarán más ejemplos sobre la misma línea.

8 Aplicación de TRANUS, un modelo integrado de usos del suelo y transporte

En este capítulo se presentan una serie de casos de estudio en los cuales se ha aplicado un software de modelación denominado TRANUS. El sistema de modelos se basa en buena medida en las propuestas teóricas y los algoritmos presentados en los capítulos precedentes. El objetivo de presentar estas aplicaciones es el ilustrar instancias específicas en que las teorías y métodos propuestos pueden ayudar en la solución de problemas de planificación reales.

El capítulo comienza con una breve descripción del software de modelación, seguido de una descripción caso a caso de las aplicaciones realizadas. Las aplicaciones presentadas no son las únicas en las cuales se ha utilizado el software. Se seleccionaron las aplicaciones más representativas en cada una de las siguientes áreas: planes urbanos de usos del suelo, planes de transporte urbano y planes de transporte regional. Al final se incluye un ejemplo de evaluación del uso de la energía. El autor estuvo involucrado en todos estos estudios junto a varios colegas, entre ellos Beatriz Pérez, Ana Morais, María Eugenia Botero y Peter Rickaby.⁵

8.1 Breve descripción del sistema TRANUS

TRANUS es un modelo integrado de usos del suelo y transporte que puede ser aplicado a la escala urbana o regional. La suite de programas tiene un doble propósito: en primer lugar la simulación de los efectos probables de la aplicación de políticas y proyectos de usos del suelo y transporte, y en segundo lugar, la evaluación de estos efectos desde puntos de vista social, económico, financiero y ambiental.

El sistema TRANUS ha estado en desarrollo por Tomás de la Barra, Beatriz Pérez y Juancarlo Añez desde 1982. Está basado en muchas de las propuestas teóricas que se presentaron en los capítulos precedentes. Desde el comienzo se adoptaron unos parámetros de diseño del sistema:

- El sistema debe ser simple y eficiente en operación, permitiendo la aplicación en computadores personales, sin por ello sacrificar detalle
- Para lograr la consistencia teórica que se defiende en este libro, el sistema adoptó un sólo marco teórico para la representación de los fenómenos urbanos y de transporte, basado en modelos multinomiales logit anidados.

⁵ **NdT:** Esta relación de aplicaciones cubre un período hasta 1987 aproximadamente. Desde entonces el sistema TRANUS se ha aplicado a cientos de casos de estudio en todo el mundo. La descripción del sistema TRANUS también corresponde a la fecha en que se publicó el libro original en inglés, y desde entonces se ha mantenido una actividad continua de investigación y desarrollo. Para ver la situación actual del sistema, visitar www.tranus.com.

- El sistema tenía que incluir al menos dos niveles espaciales jerárquicos, no sólo para ahorrar recursos computacionales y de data, sino para permitir al analista el concentrarse en áreas específicas del sistema y mejorar la calidad de los resultados.
- Debe permitir aplicaciones a cualquier nivel de desagregación, desde pequeñas áreas urbanas detalladas, hasta el nivel regional. Gracias al uso de jerarquías espaciales, es posible aplicar el sistema a una combinación urbano-regional.
- El modelo de actividades debe poder distinguir entre diversos tipos de empleo, población y usos del suelo, debe permitir la interacción espacial entre todas las actividades y debe incluir una representación explícita del mercado inmobiliario.
- El modelo de transporte debe incluir diversas capacidades tales como generación elástica de viajes, búsqueda multi-pasos y asignación multimodal, la capacidad de combinar movimientos de carga y pasajeros, giros prohibidos, transferencias entre servicios de transporte público, cálculo de los tiempos de espera y un gran número de indicadores de evaluación.
- El diseño de los programas debe permitir gran flexibilidad para facilitar aplicaciones en contextos muy diversos, en especial en países del tercer mundo.
- El sistema debe estar complementado por numerosas facilidades para la entrada y manejo de la información, ayudas a la calibración, procedimientos de evaluación y extensa generación de reportes de resultados.

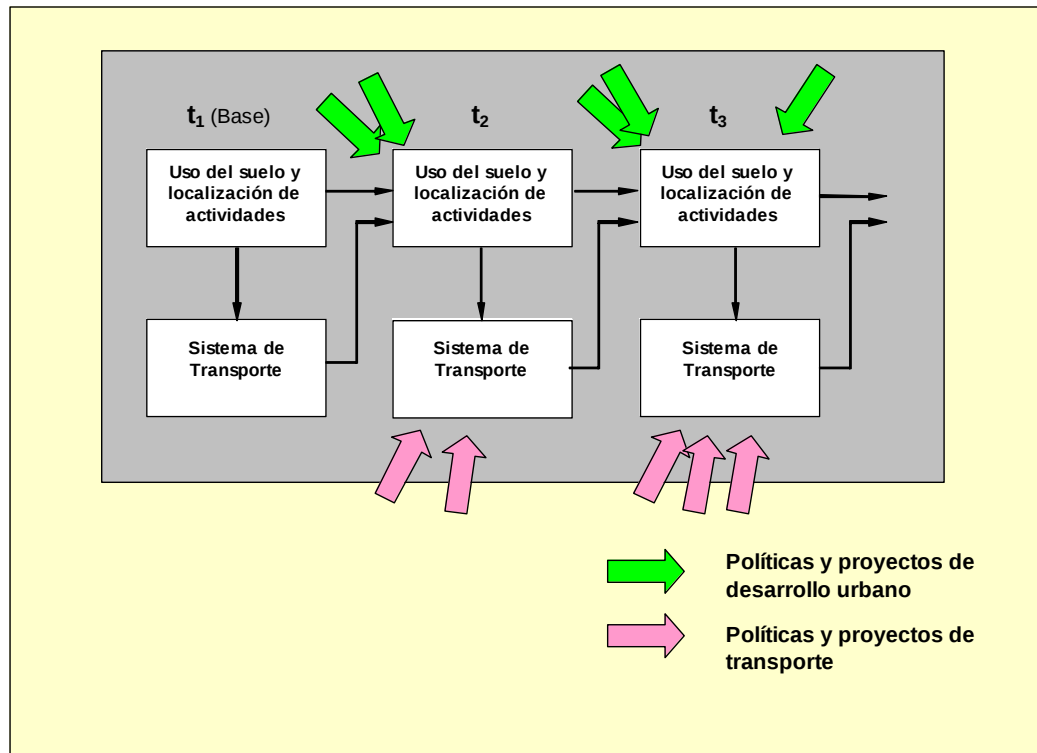
8.1.1 Estructura general del modelo

Una estructura dinámica relaciona los dos componentes principales de TRANUS: usos del suelo y transporte. La forma en que estos componentes interactúan entre sí en el tiempo se muestra en la Figura 8-1, donde intervalos discretos de tiempo se representan como $t_1, t_2, t_3, \dots$. El modelo de usos del suelo estima la localización de las actividades en las diversas zonas en que se ha dividido el área de estudio y equilibra el mercado inmobiliario. El proceso de localización genera una serie de matrices x_{ij}^n que representan los flujos funcionales del sector n de la zona i a la zona j . En el modelo de transporte estos flujos son transformados en viajes T_{ij}^n por el modelo elástico de generación de viajes, y se supone que esto ocurre en el corto plazo, es decir, ocurre en el mismo período de tiempo. Las actividades en el período t determinan la demanda de viajes en el mismo período t .

El modelo de transporte, a su vez, calcula el costo compuesto de viaje c_{ij}^n que es uno de los componentes de la función de utilidad en el modelo de localización de actividades. Estos costos son retro-alimentados, entonces, al modelo de usos del suelo, pero se supone que esto no ocurre al corto plazo, sino después de un cierto período de tiempo. Cuando se introduce una nueva facilidad de transporte, como una nueva autopista o línea de metro que mejoran la accesibilidad en determinados lugares, las actividades se tomarán su tiempo para reaccionar y cambiarán su localización de ma-

nera gradual. En consecuencia, un cambio en el transporte en el período t_1 afecta la localización de actividades en el período t_2 . Como además hay elementos de inercia entre un período y otro, el sistema de actividades y usos del suelo puede tomarse varios períodos en reaccionar a un cambio en el transporte. Como se muestra en la figura, también puede haber proyectos y políticas de desarrollo urbano que tienen un efecto gradual o en algunos casos a corto plazo. Al cambiar las actividades, la demanda de transporte se afecta de inmediato.

Figura 8-1: Relaciones dinámicas en el sistema usos del suelo y transporte



8.1.2 Cálculos en el modelo de actividades y usos del suelo

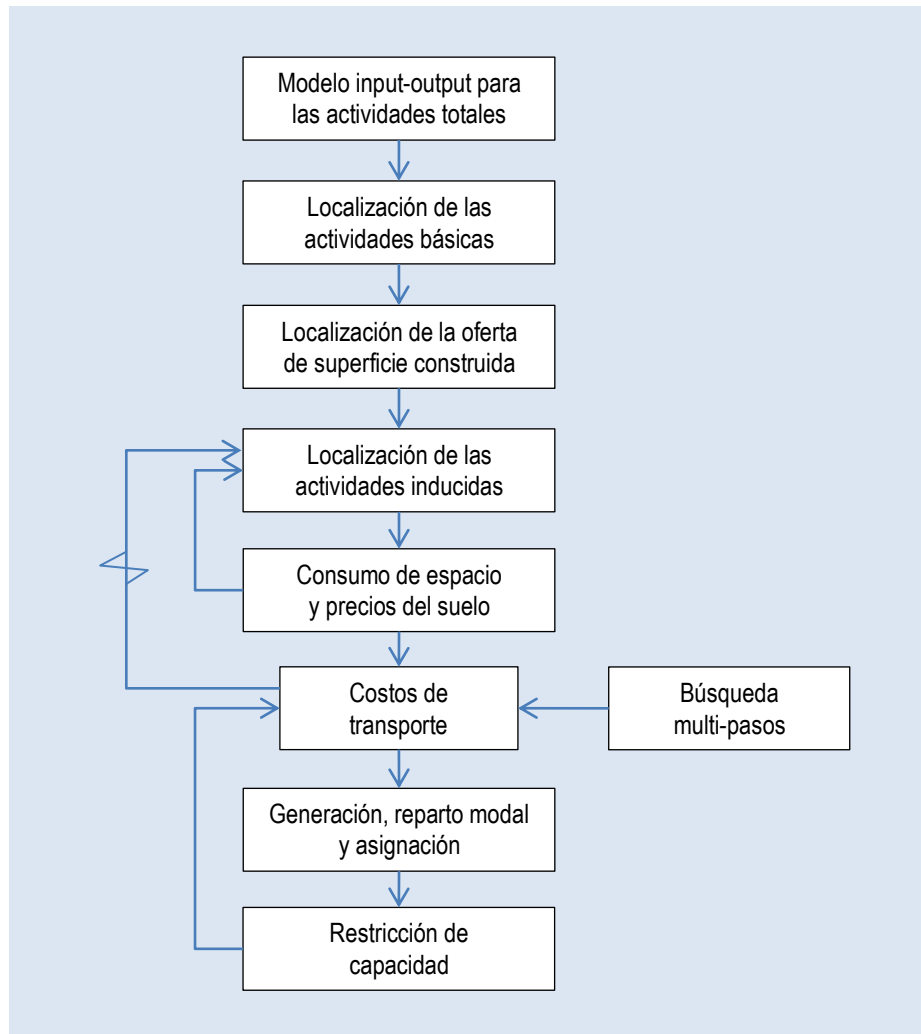
La estructura general y secuencia de cálculo del sistema de modelos se muestra en la Figura 8-2. El punto de partida para el modelo de actividades es un input-output a-espacial, que distingue entre sectores básicos de demanda final y sectores inducidos. El número y tipo de sectores es libremente determinado por el analista. Dados los totales de los sectores básicos y el conjunto de coeficientes técnicos a^{mn} el modelo estima los totales de empleo inducido y población de diversas categorías.

Luego se estima la localización de los incrementos (positivos o negativos) de los sectores básicos, teniendo en cuenta jerarquías espaciales si es que éstas han sido definidas. El analista puede asignar directamente parte de los incrementos a zonas especifi-

cas, como sería el caso de una determinada industria como parte de una política de desarrollo urbano.

Le sigue la localización de los incrementos de espacio construido, suponiendo que cualquier incremento en las actividades irá acompañado de incrementos en la oferta de espacio construido. El modelo estima la cantidad y su probable localización. La función de utilidad de la localización del espacio construido incluye los siguientes elementos: el espacio que había en el período anterior, valores del suelo *equivalentes* y espacio construido potencial. Los valores del suelo equivalentes difieren de los precios de mercado comunes en que consideran la intensidad del suelo, es decir, la cantidad de espacio que puede construirse por unidad de suelo, determinado a su vez por las regulaciones urbanísticas. Cada vez que el modelo utiliza valores del suelo, usa los valores equivalentes, pero al final del proceso los traduce de vuelta a valores de mercado. La superficie construida *potencial*, por otra parte, es el área construida que se puede agregar en una zona, calculada como la diferencia entre lo que se puede construir por regulaciones y el área que existía en el período anterior. El analista puede fijar cantidades exógenas de espacio construido para representar, por ejemplo, vivienda pública.

La próxima etapa es la localización de las actividades inducidas y la estimación de la superficie construida consumida en cada zona, como una función de demanda con valores del suelo. El consumo se compara con la oferta en cada zona y los valores son ajustados. Con esto se inicia un proceso iterativo que termina cuando se equilibra la demanda con la oferta en todas las zonas. La localización de las actividades genera flujos que se calculan simultáneamente. El analista puede decidir qué sectores participan del mercado inmobiliario y cuáles quedan fuera, como por ejemplo el empleo en educación.

Figura 8-2: Secuencia de cálculo en TRANUS

8.1.3 Cálculos de transporte

En la modelación del sistema de transporte, la primera etapa en la secuencia es la búsqueda de los n-pasos que conectan cada origen con cada destino para cada modo. Cada modo, a su vez, puede estar dividido en diversos operadores, suponiendo que los usuarios pueden trasbordar libremente de un operador a otro dentro del mismo modo. Por ejemplo, se pueden definir tres modos: carga, transporte público de pasajeros y automóvil particular. El modo carga puede tener camiones livianos y pesados y ferrocarril, mientras el transporte público puede tener autobuses, metro y taxis. De esta manera la carga puede comenzar en camión y transferir a ferrocarril, o un pasajero puede ir en autobús a una estación y continuar en metro.

La red de transporte está definida como un conjunto de enlaces interconectados. Cada arco se describe según sus características como el tipo de vía, longitud, capaci-

dad, posibles rutas de transporte público y giros prohibidos. El tipo de vía define una serie de características adicionales como velocidades, posibles cargos o peajes, costo de mantenimiento y el administrador encargado. Al final del proceso, cada paso queda definido como una secuencia de enlaces y operadores o rutas que conectan un centroide de origen con uno de destino. Cuando a lo largo de un paso hay un cambio de operador o ruta, se asume un costo y tiempo de transferencia.

Encontrados todos los pasos, la primera etapa en el proceso iterativo de transporte es la estimación de los costos de viaje a lo largo de cada paso, el costo compuesto por modo y el costo compuesto generalizado. El costo de viaje se recalcula en cada iteración para tener en cuenta el efecto de la congestión.

El modelo de actividades produce un conjunto de matrices de flujos funcionales, que el modelo de transporte debe transformar en viajes propiamente tales para determinadas horas del día (hora pico, 24 horas, etc.) El analista puede combinar varios flujos funcionales en determinadas categorías de transporte. Por ejemplo, sectores como agricultura, minería e industria pueden combinarse para generar categorías de carga como carga liviana, pesada, líquidos y contenedores.

La generación de viajes determina el número de viajes que se realizan de cada origen a cada destino para cada categoría, como una función elástica del costo compuesto de la categoría. La elasticidad en la generación significa que habrá más viajes si se reduce el costo. En cada iteración es probable que se reduzca el número de viajes debido a la congestión. La diferencia entre el número de viajes en la última iteración (equilibrio) y la primera iteración representa el número de viajes que se dejaron de hacer por culpa de la congestión, lo cual se denomina *demanda reprimida*.

Los viajes para cada categoría son distribuidos entre los modos con un modelo multinomial logit en que la función de utilidad es el costo compuesto de cada modo. El reparto se realiza entre los modos que están disponibles para cada categoría. Por ejemplo, una categoría de viaje que representa mercancías, sólo elige entre modos de carga. La elección de modos de los pasajeros está restringida por la propiedad vehicular.

Los viajes por modos son ahora asignados a los diferentes pasos que conectan los orígenes con los destinos en cada modo. Como cada paso especifica una determinada secuencia de operadores con posibles transferencias, los viajes están siendo asignados simultáneamente a enlaces y operadores. La distribución de los viajes entre los pasos se realiza con otro modelo multinomial logit en que la función de utilidad está determinada por el costo de cada paso. Los viajes se transforman en vehículos en cada enlace de la red al multiplicar por tasas de ocupación. En el caso de las rutas de transporte público, el número de vehículos en cada tramo es un dato exógeno, aunque una opción permite que el modelo los calcule en función de la demanda. Finalmente los vehículos por operador se transforman en vehículos estándar o equivalentes mediante la aplicación de tasas adecuadas.

Al final del proceso iterativo las velocidades se reducen y los tiempos de espera se aumentan en función de las relaciones entre demanda y capacidad. Una vez ajustados los tiempos, la secuencia de cálculo regresa a la estimación de costos porque la con-

gestión afecta el costo a nivel de paso y, consecuentemente, en todos los otros niveles. A su vez, los nuevos costos afectan la generación, reparto modal y asignación, e incluso la localización e interacción entre actividades en un próximo período de tiempo.

8.1.4 El procedimiento de evaluación

Para la simulación y evaluación de políticas de usos del suelo y/o transporte, se debe aplicar el modelo a lo largo del período de proyección en intervalos de tiempo discretos, tanto para un caso base donde no se incluyen las políticas, como para un escenario alternativo que sí las incluye de manera explícita. La diferencia en los resultados representa el efecto neto de la aplicación de las políticas. Al final del proceso se aplica un procedimiento de evaluación que compara los resultados del escenario base con los alternativos, con lo cual estima un buen número de indicadores tales como socio-económicos, uso de energía e indicadores financieros.

Para realizar la evaluación energética, el modelo de actividades calcula la cantidad de combustible que requiere el espacio construido para su climatización en función, entre otras variables, de la densidad de construcción y parámetros de aislantes y pérdidas/ganancias calóricas. En el caso de la energía relacionada con el transporte, el modelo estima los consumos de combustible de los vehículos en función de la velocidad, resultados que el procedimiento de evaluación transforma en unidades energéticas. También se les puede convertir en emisiones contaminantes.

Para la evaluación económica y financiera es necesario introducir al procedimiento datos adicionales, como el costo de inversión del escenario alternativo a través del tiempo, tasas de descuento, y el precio sombra de determinados componentes. Con estos datos el procedimiento estima los indicadores clásicos como la relación beneficio/costo (B/C), el valor presente neto (VPN) y la tasa interna de retorno (TIR), considerando costos económicos o financieros.

8.2 Aplicaciones en planificación urbana

8.2.1 Plan de desarrollo de Curaçao

El propósito de esta aplicación fue dar soporte al diseño de un plan de desarrollo urbano para la isla de Curaçao (población 1981: 147 mil habs.) y su principal ciudad Willemstad. En 1976 se había diseñado un plan que incluyó propuestas generales relacionadas con los usos del suelo y el sistema de transporte (DROV, 1976). La idea era actualizar este plan y darle más precisión a las propuestas.

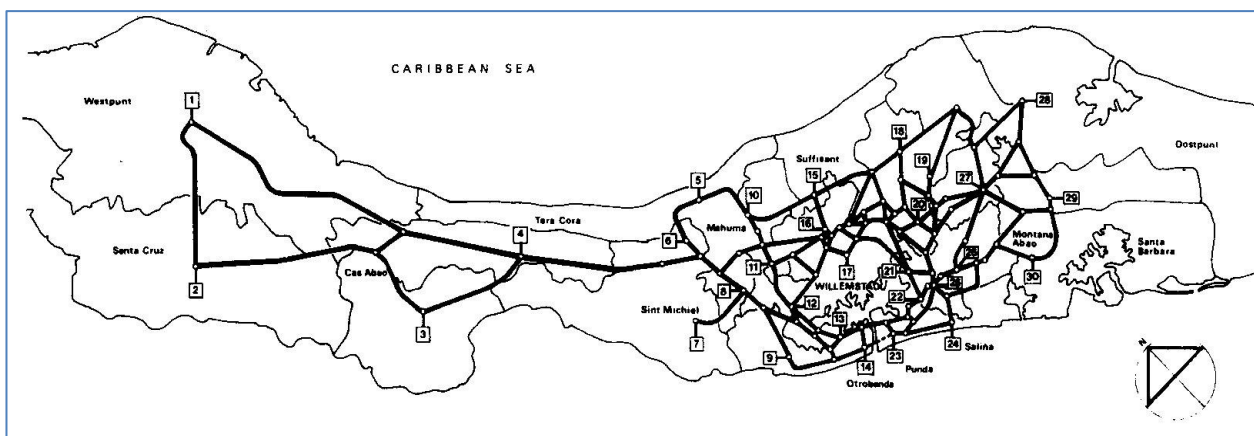
El sistema TRANUS se calibró para el año base censal de 1981 (DROV, 1986)⁶ fecha para la cual se disponía de toda la información necesaria, incluyendo una versión rudimentaria de matrices origen-destino y otros datos de transporte. Las zonas censales

⁶ **NdT:** Históricamente, el modelo desarrollado para Curaçao fue la primera aplicación 'profesional' del sistema TRANUS, que en esa época estaba desarrollado para computadoras personales muy limitadas bajo el sistema operativo CPM. TRANUS fue el primer modelo de transporte en el mundo en operar en computadores personales.

fueron agregadas en 30 zonas de transporte para cubrir toda la isla, como se muestra en la Figura 8-3.

La población se representó en términos de hogares de tres grupos de ingreso, se consideraron cuatro tipos de suelo y el empleo también distinguió cuatro sectores. En el transporte se modelaron viajes al trabajo para cada tipo de hogares, además de viajes a servicios y a educación. La red se codificó con siete tipos de vía que podían ser utilizados por automóviles y vehículos de transporte público con buses y minibuses.

Figura 8-3: Zonificación y red de transporte para el estudio de Curaçao



Los valores simulados de la localización de actividades, valores del suelo, orígenes y destinos en la hora pico y volúmenes de tránsito fueron comparados con la data existente. Dada la buena calidad de la información y el cuidado con que había sido recabada, fue posible hacer una calibración detallada que resultó en valores modelados muy cercanos a los reales.

Las tendencias históricas del crecimiento de los sectores básicos junto a un estudio global de la economía de la isla, permitió predecir el crecimiento futuro de los sectores básicos. Dado que en esa época se consideraba que las perspectivas económicas no eran muy buenas, se trabajó sobre la base de dos escenarios futuros: tendencial y bajo, este último con reducciones en todos los sectores.

Desde el punto de vista de la política urbana, se diseñaron cuatro políticas alternativas: una política tendencial, una política concentrada, una orientada al este y otra hacia el oeste, dependiendo del énfasis de los proyectos de desarrollo. En total se modelaron 5 escenarios, ya que el escenario bajo sólo se modeló con el tendencial. Cada escenario incluyó proyectos de vivienda pública y un programa común de desarrollo de las carreteras. El modelo se aplicó para períodos quinquenales desde el base 1981 hasta 1995. El primer escenario correspondió al año conocido 1985 para el cual se había recolectado datos que permitieron verificar el comportamiento dinámico del sistema.

Los resultados fueron útiles de varias maneras. El propósito principal del ejercicio de modelación fue el determinar cuál dirección debía seguir el desarrollo urbano. El plan maestro de 1977 había sugerido que el énfasis hacia el oeste debía ser preferido. Los resultados de la modelación demostraron que la expansión del área urbana en cualquier dirección produciría efectos negativos desde diversos puntos de vista, y que el área urbana existente tenía suficiente capacidad para absorber el crecimiento y los cambios esperados en los usos del suelo. En consecuencia, la política de desarrollo urbano que se adoptó finalmente fue una de 'relativa concentración', junto a programas de vivienda que rellenaban espacios céntricos poco utilizados, en lugar de desarrollar espacios mayores en la periferia. Los resultados de la modelación también fueron utilizados para dimensionar el programa de vivienda.

En el lado del transporte, se demostró que la red de autobuses tenía problemas de capacidad y que los retornos de una flota expandida serían suficientes para cubrir los costos de inversión. De hecho se trajeron nuevos autobuses, con lo cual se demostró que la predicción era correcta. Los resultados de la asignación demostraron que un anillo periférico propuesto no era necesario, por lo cual fue descartado del plan de inversiones.

La principal conclusión de esta aplicación es que un modelo integrado de usos del suelo y transporte puede ser de gran utilidad para el diseño de políticas urbanas, principalmente porque provee consistencia a las numerosas políticas y proyectos que generalmente se incluyen en el plan de desarrollo. Por ejemplo, si se estima que la industria turística será un sector dinámico, se debe esperar más empleos en el centro, ante lo cual una política relativamente concentrada contribuye a mejorar las relaciones hogar-trabajo (y el medioambiente), haciendo innecesaria la construcción de vialidad periférica.

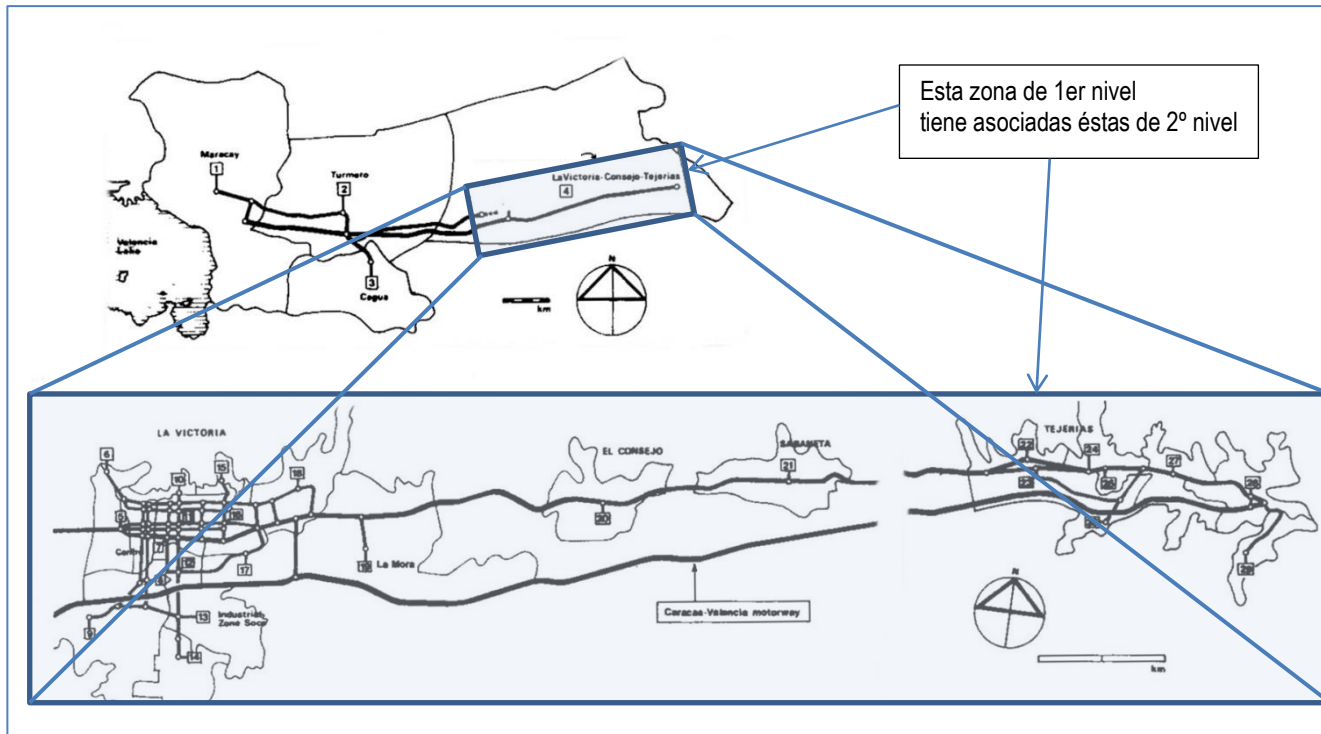
8.2.2 El Plan Maestro de La Victoria

El propósito de esta aplicación fue similar a la de Curaçao, es decir, la aplicación del sistema TRANUS para guiar el diseño de un plan de desarrollo urbano. Los resultados fueron reportados en MINDUR (1986).

El área urbana de La Victoria en Venezuela (población 1981: 109 mil habitantes) comprende tres centros, como puede verse en la Figura 8-4, y mantiene fuertes vínculos con las regiones circundantes. Por esta razón se decidió por una zonificación en dos niveles jerárquicos: cuatro regiones en el primer nivel, de las cuales La Victoria pertenece a una de ellas, y un segundo nivel más detallado con 25 zonas.

Los datos fueron recopilados de varias fuentes, y comprendió cuatro categorías de empleo, tres de población y tres tipos de suelo. Se distinguió entre transporte privado y público, este último con buses y minibuses con varias estructuras tarifarias. Con estos datos el modelo fue calibrado para 1981 y 1985 para verificar el comportamiento dinámico.

Figura 8-4: Zonificación jerarquizada y red de transporte para el estudio de La Victoria



En la década de los 70, el área presentó un crecimiento muy alto con una tasa anual de un 7% para los sectores básicos, y tasas similares para los demás sectores de empleo y la población. Sin embargo, a partir de 1981 el ritmo de crecimiento decayó, lo cual llevó a definir dos escenarios a futuro: uno alto con promedio anual de 3,5% y uno bajo con 2,5% anual. Las proyecciones y simulaciones fueron llevadas a cabo en períodos de cinco años desde 1985 hasta el 2005.

En lugar de desarrollar varios escenarios de usos del suelo a futuro, como en el caso de Curaçao, aquí se adoptó uno solo, procediendo con un enfoque iterativo. Inicialmente se diseñaron diversas políticas y se modelaron hasta el final del período de proyección. Los resultados fueron analizados, llevando a modificar las políticas para hacer un segundo juego de simulaciones. El proceso se repitió varias veces hasta que el equipo de planificadores estuvo satisfecho en que se había logrado el mejor plan. Cada vez las políticas se modelaron con los escenarios alto y bajo para verificar la solidez de los resultados.

Como resultado, el modelo no sólo resultó útil para el proceso de diseño, sino que formó parte integral de él. Además el modelo fue instalado en la agencia local, que siguió por un tiempo mejorando las políticas e incrementando el nivel de detalle. Así, por ejemplo, poco después de terminado el plan, apareció una propuesta de ferrocarril que afectaba seriamente el área urbana, tal que el modelo se utilizó para evaluar estos efectos y modificar la propuesta.

Desde un punto de vista metodológico, la adopción de una zonificación jerárquica fue útil, ya que La Victoria se encontraba compitiendo con otras regiones circundantes para atraer nuevas industrias y desarrollos de viviendas. Los resultados indicaron que no podría mantener el ritmo acelerado sino hasta 2005, cuando presenta un despeque al saturarse las áreas competitivas.⁷ La zonificación jerárquica también fue útil para predecir el tráfico en las vías regionales y una cantidad importante de tráfico de paso. Los resultados muestran que en el futuro el tráfico de paso presentará un problema serio para el área urbana.

8.3 Aplicaciones en planificación de transporte urbano

8.3.1 Extensión del sistema Metro de Caracas

La Figura 8-5 muestra el Área Metropolitana de Caracas y regiones circundantes (Población 1981: 4.5 millones). Se caracteriza por una alta densidad de actividades, con concentración de empleo de gobierno y servicios. La red viaria está basada en un número reducido de autopistas urbanas. Los niveles de congestión son particularmente altos, con lo cual la ciudad consideró la construcción de una red de metro de alta capacidad, con los primeros estudios alrededor de 1966. La figura también muestra las líneas de metro y la propuesta de extensión hacia el sur.

El sistema metro ha sido muy exitoso al proveer un servicio de alta calidad a un gran número de personas, pero ha podido hacer poco por el creciente número de personas que viven en las áreas de expansión separadas entre 20 y 50 Km por montañas. Para contribuir a esta problemática, Metro de Caracas inició los estudios para una línea al sur hasta la localidad de Los Teques, como se muestra en la figura.

Para la estimación de la demanda, se aplicó el sistema TRANUS a toda la región. Se consideró necesario incluir esta área ampliada porque las áreas de expansión compiten entre ellas por captar el desarrollo, con lo cual si se mejora la accesibilidad a una de ellas las demás se sienten afectadas. Los resultados de esta aplicación se reportaron en CAMETRO (1987).

El tiempo asignado al estudio fue muy breve, razón por la cual se modeló con un número relativamente reducido de zonas. La red de transporte, sin embargo, contenía cierta complejidad, ya que fue necesario representar las rutas de metro, buses urbanos y suburbanos, bus integrado a metro y otros componentes.

El modelo fue calibrado para 1981 y 1985 y se adoptó un único escenario de crecimiento a futuro, en períodos quinquenales hasta el 2005. Se modelaron dos escenarios de transporte: con y sin la extensión del metro propuesta. El resto de los elementos como los usos del suelo, vivienda pública, el sistema de transporte y el metro, todos ellos se mantuvieron iguales para los dos escenarios para proveer un carácter *ceteris paribus* a los análisis.

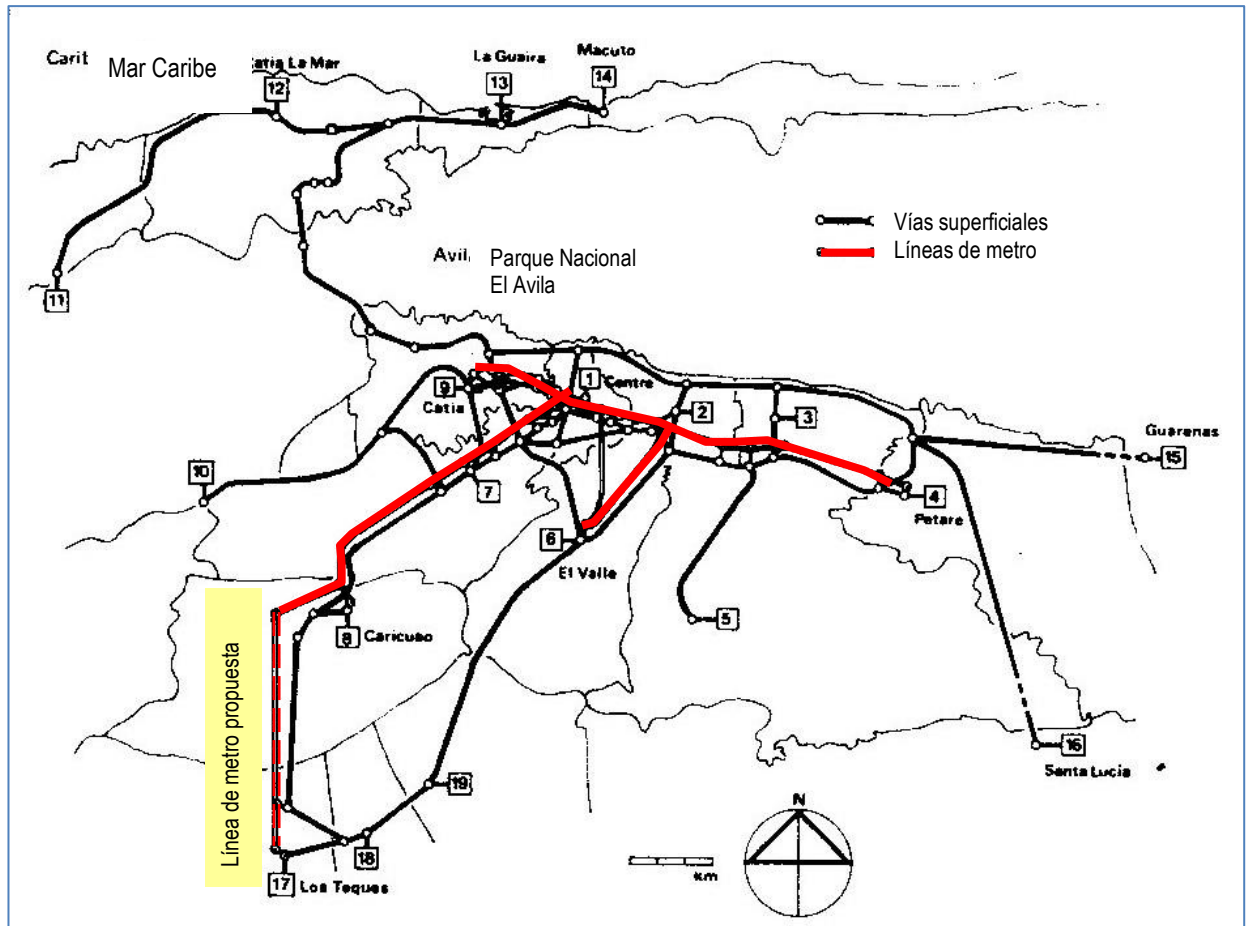
Los resultados fueron bastante más allá de los objetivos originales, principalmente el dimensionamiento de la extensión del metro y si su construcción resultaba recomen-

⁷ NdT: Esto de hecho ocurrió.

dable. El estudio demostró que la línea de metro sí era favorable desde diversos puntos de vista, tanto para los usuarios como para la operación del metro. Sólo quedaron dudas acerca de la rentabilidad de la inversión dado el alto costo de la misma. Los resultados se utilizaron para calcular el tamaño y frecuencia de los trenes, la capacidad de las estaciones y la tarifa con la que debería operar. También el estudio aportó ideas y perspectivas acerca del comportamiento futuro de todo el sistema metro. Por ejemplo identificó puntos del sistema en que la demanda será alarmantemente alta, sobrepasando la capacidad. El análisis también demostró el potencial del área de Los Teques para absorber desarrollo urbano futuro, potencial que está directamente relacionado con la accesibilidad. La extensión propuesta para el metro no sólo servirá como mero medio de transporte, sino que permitirá, además, la incorporación de una vasta área residencial, reduciendo el costo de vida para una proporción importante de la población.⁸

⁸ **NdT:** Hoy en día la extensión del metro hasta Los Teques está operando y coincide con los resultados de las estimaciones en orden de magnitud. El impulso al desarrollo inmobiliario es particularmente notorio. También los altos niveles de demanda en las líneas principales del metro ya fueron alcanzados, lo cual ha llevado a un continuo programa de inversiones.

Figura 8-5: Zonificación y red de transporte para el estudio de la extensión del Metro de Caracas



8.4 Aplicaciones de planificación de transporte regional

8.4.1 Autopista Caracas-La Guaira

Caracas está unida a la costa con una autopista. A lo largo de la costa hay una delgada cinta urbana entre el mar y las montañas. El área está densamente ocupada y desarrolla funciones importantes, alojando el principal puerto y aeropuerto, además de innumerables facilidades turísticas. Dada su cercanía a Caracas, también juega un rol de ciudad dormitorio con unos 400 mil habitantes, similar al caso de Los Teques que se describió anteriormente. Esto obliga a muchas personas a viajar cotidianamente y como resultado el número de viajes en la autopista se ha incrementado. Los fines de semana los visitantes de las playas deben hacer cola por horas.

La Autopista Caracas-La Guaira también tiene problemas físicos con frecuentes deslizamientos de tierra, lo cual incrementa los costos de mantenimiento. Para resolver algunos de estos problemas se han concebido varios proyectos, desde ampliaciones,

vías paralelas y ferrocarril. El gobierno concibió la posibilidad de entregar la autopista en concesión, y para las negociaciones requirió un completo estudio de demanda futura. Los resultados se reportaron en MTC (1986). Al igual que el estudio anterior, la calibración del modelo fue para 1981 y 1986.

Se realizaron proyecciones quinquenales hasta el 2006, considerando diversos escenarios. Un primer escenario tendencial supuso que no habrá proyectos alrededor de la autopista. Un segundo escenario supuso la construcción de una segunda autopista paralela a la existente. Un tercer escenario incluyó un ferrocarril de pasajeros, y un cuarto escenario incluyó al ferrocarril y la segunda autopista.

Un primer resultado interesante de la calibración a 1986 es que el peaje existente debía recaudar al menos el doble de lo que declaraba la agencia de cobro, una conclusión similar a la que llegó una comisión de diputados que investigaba el problema de la corrupción en las estaciones de peaje. El dinero que debería recaudar debería ser suficiente para cubrir los costos de mantenimiento de la autopista y de toda la vialidad complementaria. Este recaudo, según los resultados del modelo, se incrementaría a futuro, pero mucho más lento de lo esperado. La razón para esto es que el área de la Guaira tiene limitaciones físicas para el desarrollo urbano, tal que éste se orientará a otras áreas alrededor de Caracas.

Los resultados del modelo mostraron que al introducir una segunda autopista la demanda crecería, pero no de manera importante debido a las limitaciones del desarrollo urbano en la costa. La segunda autopista resultó algo más exitosa que el ferrocarril, ya que puede atraer todo tipo de tráfico, mientras el tren movería sólo pasajeros. Además, como ambos tendrían una pendiente pronunciada, la velocidad del ferrocarril ser afectaría más que la de los autobuses.

Paradójicamente, desde el punto de vista del concesionario, el escenario tendencial de hacer nada resultó el más rentable. La segunda autopista duplicaba sus costos de mantenimiento y sólo incrementaba los ingresos en 30%. El ferrocarril, que sería operado por otro ente, simplemente le reducía los ingresos. Hacer tanto la autopista como el ferrocarril resultó su peor escenario. De hecho, luego del estudio el gobierno desistió de todos estos proyectos, a pesar que el ferrocarril estaba a nivel de ingeniería de detalle, y desvió los fondos a otros proyectos.

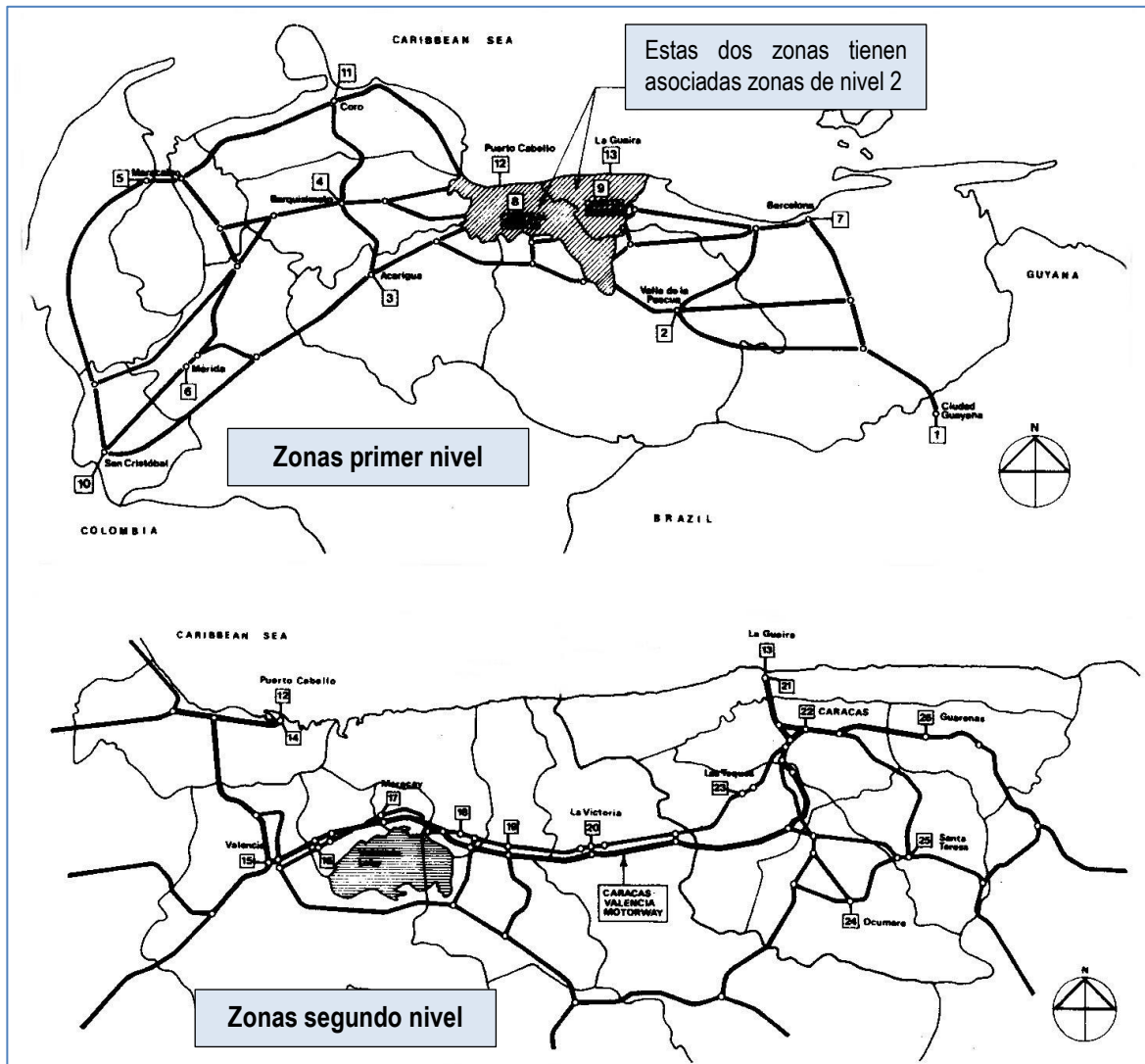
Como se mencionó, lo que explica el crecimiento lento de la demanda en el corredor Caracas-La Guaira es la poca capacidad del área urbana costera para albergar nuevo desarrollo. Resulta claro que este análisis sólo se puede hacer con un modelo integrado de usos del suelo y transporte.

8.4.2 Ferrocarril Central de Venezuela

Venezuela sólo tiene un ferrocarril relativamente corto que conecta las ciudades de Acarigua, Barquisimeto y Puerto Cabello. Por mucho tiempo las autoridades ferroviarias han estado planificando una ambiciosa red para todo el país, destacando el tramo entre Puerto Cabello, Valencia y Caracas, que tendría un impacto de importancia estratégica para la economía de todo el país.

Se aplicó el sistema TRANUS a todo el territorio de Venezuela dividido en regiones en un primer nivel jerárquico y luego zonas más pequeñas en un segundo nivel jerárquico para las dos regiones directamente afectadas por el ferrocarril, lo cual se muestra en la Figura 8-6. Los resultados del estudio están reportados en FERROCAR (1987). El estudio tuvo un doble objetivo: por una parte estimar la demanda para el dimensionamiento de estaciones, capacidad de las líneas, flota, etc., y por otra estimar los efectos socioeconómicos espaciales del proyecto.

Figura 8-6: Zonificación jerárquica y red de transporte para el estudio del ferrocarril Caracas-Valencia-Puerto Cabello



Esta ha sido por lejos la aplicación más compleja del sistema TRANUS hasta ahora.⁹ El modelo debió simular la localización de población por estratos y empleo por sectores en todo el país. Se definieron zonas externas para representar importaciones y exportaciones. Debió modelar el movimiento de mercancías de diferentes tipos (carga liviana, carga general, graneles pesados) utilizando camiones de diversos tipos y ferrocarril. El modelo debió simular además la localización de la población por estratos, y los viajes que realizan al trabajo y servicios, utilizando automóviles, autobuses regionales y suburbanos, y ferrocarril de pasajeros regionales y suburbanos. Adicionalmente los accesos a las ciudades involucraron buses urbanos y metro.

Para calibrar un sistema tan complejo, se realizaron entrevistas en puntos estratégicos de las carreteras. Se pararon todos los camiones para preguntar sobre la carga que llevaban y los orígenes y destinos. Todos los autobuses fueron interrogados de manera similar, complementado con información recabada en los terminales. En el caso de los automóviles se detuvo a una muestra para preguntar origen-destino y propósito del viaje. Fue a partir de estas entrevistas que se estimaron los coeficientes intersectoriales en el modelo de insumo-producto.

Después de un extenso esfuerzo de calibración, se realizaron proyecciones hasta el año 2010 sobre la base de dos escenarios: con y sin ferrocarril. Los resultados mostraron que la demanda de carga y pasajeros crecerá de manera permanente y significativa, y que el ferrocarril tendrá un impacto notorio en la localización de las actividades. El modelo de usos del suelo reveló la emergencia de una gran ciudad lineal que se está desarrollando desde los Valles de Tuy hasta Valencia, unos 200 Km. Desde el punto de vista de transporte, los resultados indican que si el ferrocarril no se construye, la principal autopista del eje Caracas-Valencia comenzará a mostrar serios problemas de congestión, deteriorando su nivel de servicio de manera alarmante. La demanda de pasajeros en el ferrocarril llega a unos 250 mil pasajeros diarios.

Una vez establecida la conveniencia del ferrocarril, se realizó un segundo conjunto de corridas del modelo para determinar en mayor detalle el tamaño y ubicación óptima de estaciones, y la frecuencia y capacidad de los servicios interurbanos y suburbanos de pasajeros. Se realizaron también pruebas de sensibilidad a las tarifas. El modelo fue instalado en los equipos de la autoridad ferroviaria con entrenamiento al personal, y se sigue utilizando hasta el día de hoy.¹⁰

Desde un punto de vista metodológico, se puede aseverar que una aplicación compleja como la descrita es perfectamente factible a costos razonables. El software demostró ser lo suficientemente liviano como para permitir un gran número de simulaciones de escenarios en computadores personales. Desde el punto de vista teórico, se demostró que el conjunto de modelos logit anidados puede aplicarse exitosamente a nivel nacional. El algoritmo de búsqueda de pasos múltiples con asignación logit pre-

⁹ **NdT:** Este comentario es de 1987. Desde entonces el sistema TRANUS ha sido aplicado a sistemas mucho más complejos y detallados que el que se reseña aquí. El traductor deja este comentario sólo por fidelidad al texto original.

¹⁰ **NdT:** Hoy en día el proyecto tiene un buen estado de avance, con un tramo desde Puerto Cabello hasta Maracay prácticamente concluido. Sin embargo no ha entrado en operación.

sentó un muy buen comportamiento, al representar transferencias entre autobuses y trenes, buses urbanos y metros, así como la capacidad de representar los movimientos de diversos tipos de carga. Como las simulaciones representaban un día genérico 24 horas, las matrices de demanda eran simétricas, y la red regional también lo era, los resultados de la asignación demostraron que el algoritmo es independiente de la topología de la red. De hecho, los conteos de tráfico en las principales vías mostraron que las diferencias en un sentido y otro en las vías son muy pequeñas, menores a 5%, debidas más probablemente a errores en las mediciones que a un comportamiento asimétrico.

Finalmente destaca desde el punto de vista metodológico la forma en que se calcularon los coeficientes técnicos del modelo input-output, utilizando las encuestas origen-destino en carretera. A los camiones se les preguntó por la carga que transportaba, el lugar de origen y destino, y la actividad económica tanto del origen como del destino, por ejemplo, de una finca agrícola a una planta procesadora de alimentos. Con esta información se calcularon los coeficientes inter-sectoriales.¹¹

Este mismo modelo fue luego utilizado para la evaluación económica y financiera en cinco estudios para autopistas en régimen de concesión. Los resultados se reportan en MTC (1987). Se modelaron 7 escenarios: uno sin ninguna autopista, un escenario para cada autopista, y un escenario con todas las autopistas simultáneamente. El propósito del estudio fue estimar y proyectar la demanda, estimar los beneficios económicos, las tarifas de los peajes en cada caso y los flujos financieros de cada concesión.

8.5 Energía en usos del suelo y transporte

8.5.1 Escenarios alternativos de uso de energía en áreas urbanas

Esta investigación fue realizada por el autor con Peter Rickaby en el Centre for Configurational Studies de la Open University, UK, y se reporta en Rickaby y de la Barra (1987). El punto de partida de la investigación fue la relación entre la organización espacial de la sociedad y el uso de energía. Generalmente se piensa que los asentamientos humanos compactos utilizan menos combustible, y que para ahorrar este recurso se debe evitar los desarrollos dispersos en la periferia y redireccionarlo a las áreas urbanas existentes. Tal política tiene la intención de reducir las distancias entre lugares de trabajo y residencia y promover el cambio desde el automóvil al transporte público que es mucho más eficiente desde el punto de vista de la energía.

Llevado al extremo, lo ideal desde el punto de vista de la energía es que nadie viaje. Resulta obvio que lo que se busca no es la conservación absoluta del combustible, sino la relativa eficiencia. En otras palabras, el asentamiento ideal es aquel que ahorra la máxima cantidad de combustible con la tecnología existente, y al mismo tiempo

¹¹ **NdT:** Versiones actualizadas de este modelo se utiliza hasta el día de hoy con diversos propósitos, desde estudios de preinversión en carreteras y ferrocarriles hasta logística industrial para minería y explotación petrolera.

maximiza la movilidad, o como se demostró en este estudio, se obtiene con el menor costo social.

Los objetivos de este estudio fueron a) desarrollar una metodología para evaluar costos y beneficios en términos de energía, y b) explorar un conjunto de opciones realistas para el desarrollo futuro para un asentamiento urbano típico y evaluarlos desde el punto de vista de la energía.

El sistema TRANUS estima el uso de dos tipos de energía: espacio construido y transporte. La calefacción de los espacios se calcula como una función del área construida consumida por cada unidad de actividad de determinado tipo en cada zona, además de un parámetro de eficiencia del sistema de calefacción y un parámetro de *retrofit* o reconversión para estimar la inclinación de los hogares para mejorar la eficiencia de sus calefacciones e invertir en materiales aislantes. El combustible utilizado por los vehículos se calculó por tipo de vehículo y la velocidad en cada enlace de la red luego de la restricción de capacidad.

Se recopiló información de 20 ciudades británicas con poblaciones entre 50 y 150 mil habitantes, data que se combinó con estadísticas nacionales para generar una configuración 'arquetipo' con estimaciones de población, empleo y suelo en 52 zonas, además de una red de transporte. La idea del arquetipo es liberar el análisis de irregularidades locales. El modelo fue calibrado contra esta base de datos idealizada, que se presenta diagramáticamente en la Figura 8-7 identificada como la configuración 0. La data para calibrar la función de calefacción doméstica se obtuvo de estudios del stock construido en Gran Bretaña por Penz (1983) y Leach y Pellow (1982). Los consumos de los vehículos se obtuvieron de casos típicos del parque británico.

Sobre esta base se desarrollaron cinco configuraciones alternativas para representar opciones de desarrollo realistas y comparar sus propiedades con respecto a accesibilidad y uso de la energía. Las características de cada configuración estuvieron basadas en especulaciones publicadas acerca de las diversas políticas que pueden reducir el uso de energía en las construcciones, en el transporte o en ambos. De esta manera cada configuración representó lo siguiente:

Configuración 1: concentración del nuevo desarrollo en el centro de la ciudad.

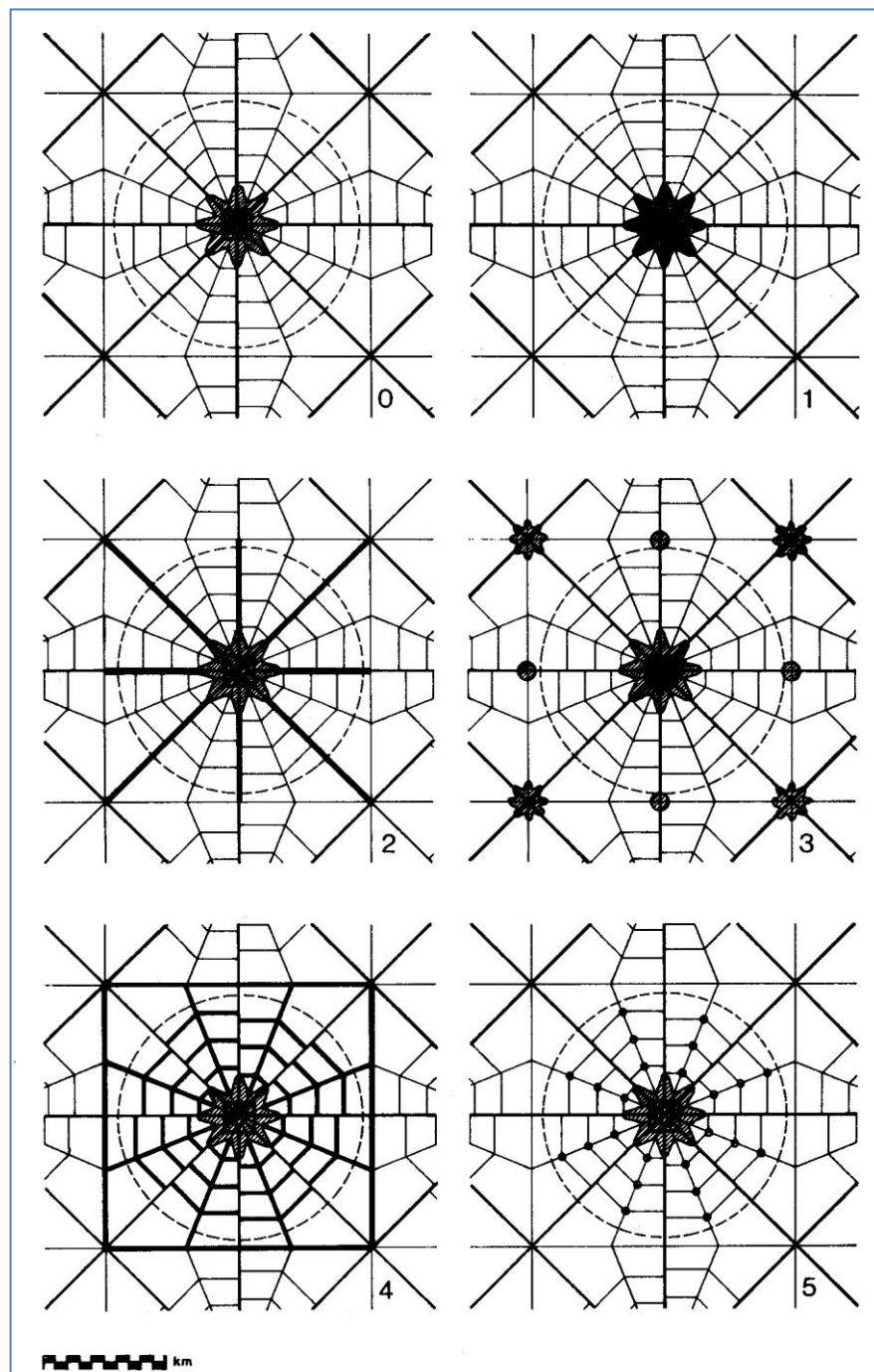
Configuración 2: concentración en desarrollos lineales a lo largo de corredores

Configuración 3: concentración en desarrollos en satélites

Configuración 4: dispersión en corredores lineales

Configuración 5: dispersión en núcleos

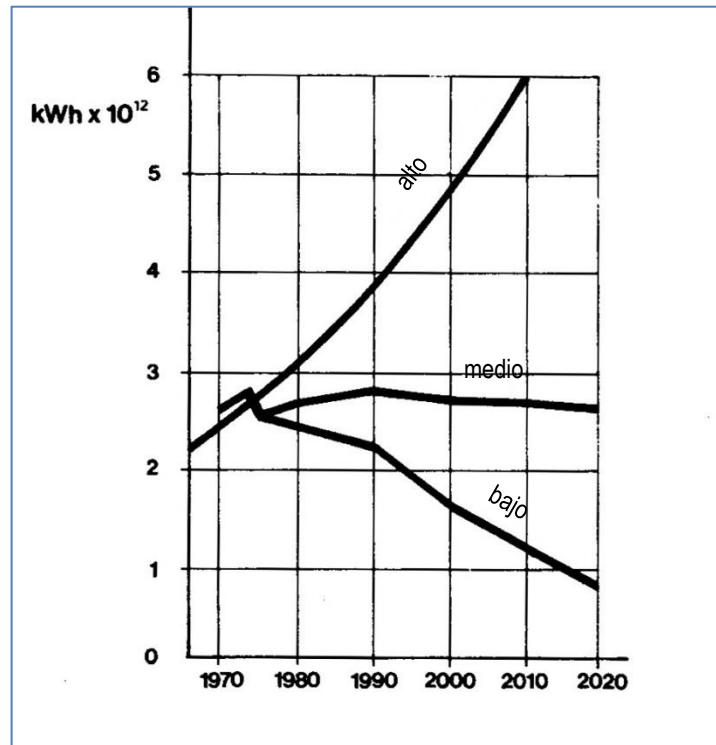
Las seis configuraciones tenían la misma red de transporte, los mismos totales de población y empleo, y la misma área central. Se supuso que las políticas eran el producto de un plan estratégico para 25 años.

Figura 8-7: Seis patrones de desarrollo urbano para la evaluación energética

Adicionalmente estas configuraciones espaciales se modelaron en el contexto de tres escenarios energéticos, dentro de un rango de posibilidades realistas de energía y desarrollo económico en el período proyectado de los 25 años. Variaron desde un escenario de alta energía de tipo continuista (*business as usual*), un escenario inter-

medio con desarrollo económico pero con políticas de ahorro energético, hasta un escenario de políticas muy estrictas de ahorro combinadas con crecimiento económico bajo, con cambios en los estándares de vida. La Figura 8-8 muestra el consumo de combustible en cada uno de estos escenarios energéticos primarios.

Figura 8-8: Consumo de combustible en los tres escenarios energéticos



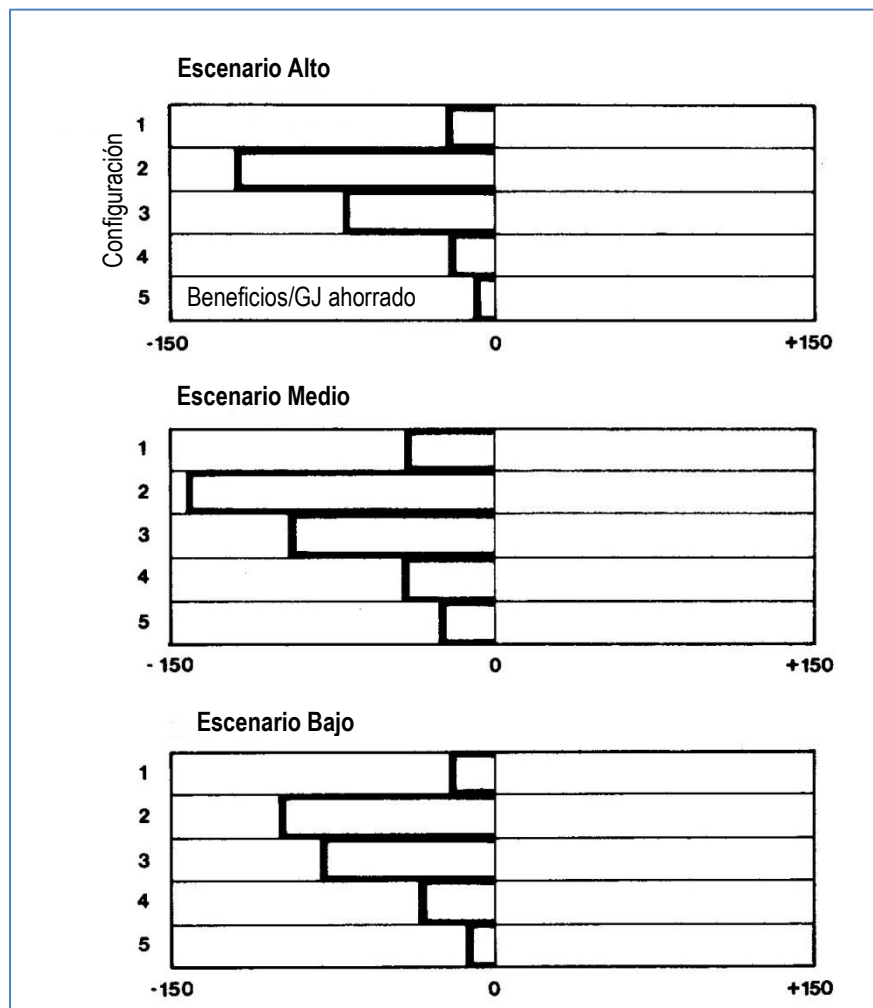
Para comparar las diversas configuraciones y escenarios, se adoptó una unidad estándar relacionada con los beneficios energéticos: *utils/gigajules* ahorrados (U/G). *Utils* es el nombre que se le dio al indicador de utilidad promedio que combina usos del suelo y transporte derivado de la ecuación (4-11). Los resultados del modelo, que se muestran en la Figura 8-9 muestran que en las cinco configuraciones alternativas se consume menos energía que en el caso base, pero a la vez, en todos los casos hay una pérdida de beneficios. Los mayores ahorros en combustible, principalmente de transporte, se da en la configuración 1, que es el resultado de una sostenida política de contener la expansión urbana, incrementando la densidad en aproximadamente un tercio, con la correspondiente reducción en la longitud de los viajes.

La siguiente configuración en términos de ahorro de combustible es la 3 basada en centros satelitales a cierta distancia del centro de la ciudad. Sin embargo estos ahorros provienen principalmente del espacio doméstico, compensado con viajes más largos. Los ahorros en combustible son los más costosos en esta configuración, variando de 70 a 93 U/G dependiendo del escenario energético. Los ahorros de menor costo se dan en la configuración 5, con la población localizada en pequeños asenta-

mientos periféricos, variando de 10 a 25 U/G. En el sector transporte hay importantes beneficios asociados con ahorros de combustible: 55, 234 y 200 U/G en los escenarios energéticos alto, medio y bajo respectivamente. Las configuraciones 2 y 4 son configuraciones lineales que producen ahorros en combustible doméstico, compensado por un incremento en transporte debido a la concentración del tráfico en las vías principales.

Resulta interesante examinar los resultados desde el punto de vista de los escenarios energéticos. En el escenario alto, el patrón existente parece ser el más apropiado. En el escenario medio las configuraciones 1 y 5 serían las más apropiadas como políticas de planificación urbana. En un escenario muy bajo con restricciones, las configuraciones 1 y 5 vuelven a aparecer como las más convenientes, pero las altas densidades asociadas con la configuración 1 pueden limitar la explotación de la energía solar para calefacción, que es un componente importante en este escenario.

Figura 8-9: Resumen de la evaluación para cada escenario energético y configuración espacial



Desde un punto de vista general metodológico, esta aplicación demuestra que un modelo integrado de usos del suelo y transporte puede ser muy útil para evaluar las consecuencias energéticas derivadas de las políticas urbanas. El enfoque integral es esencial porque la energía dentro de los espacios y la energía de transporte están íntimamente relacionadas. En la aplicación que se reporta aquí, el modelo fue aplicado a una ciudad hipotética, pero puede ser aplicado a cualquier ciudad real.¹² Más aún, la complejidad de los cálculos energéticos involucrados sugiere que ésta es probablemente la única metodología que disponemos actualmente para este tipo de análisis. En consecuencia, la evaluación energética representa una de las áreas de investigación y desarrollo más promisorias para la aplicación de modelos integrados de usos del suelo y transporte en las ciudades de USA y Europa.

¹² **NdT:** De hecho, el mismo equipo aplicó el modelo y la metodología de estimación de energía a la ciudad de Swindon. Ver www.tranus.com/downloads

Referencias

- Alonso, W. (1954) *Location and Land Use*. Cambridge, MA: Harvard University Press
- Anas, A. (1982) Residential Location Markets and Urban Transportation, en *Economic Theory, Econometrics, and Policy Analysis with Discrete Choice Models*. New York: Academic Press
- Angel, S. y Hyman, G. M. (1971) *Urban Spatial Interaction*. CES WP 69. London: Centre for Environmental Studies
- Barto, A. G. (1978) Discrete and continuous models. *International Journal of General Systems*, **4**, 307-32
- Batty, M. (1975) In defense of land use modelling. *The planner: Journal of the Royal Town Planning Institute*, **61**, 184-7
- (1976) *Urban Modelling: Algorithms, Calibrations, Predictions*. Cambridge: Cambridge University Press
- Baxter, R. (1976) *Computer and Statistical Techniques for Planners*. London: Methuen and Co.
- Baxter, R. y Williams, I. (1973) *The Third Stage in Disaggregating the Residential Sub-model*. WP 66. Cambridge: Land Use and Built Form Studies
- (1975) An automatically calibrated urban model, *Environment and planning A*, **7**, 3-20
- Blunden, W. R. (1971) *The Land-Use Transport System*. London: Pergamon Press
- Broadbent, T. A. (1973) *Activity Analysis of Spatial Allocation Models*. CES WP 82. London: Centre for Environmental Studies
- Buchanan, C. (1963) *Traffic in Towns*. London: HMSO
- Bunge, M. (1973) *Method, Model and Matter*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Co.
- CAMETRO (1987) *Demanda de Transporte Línea Metro las Adjuntas-Los Teques*. Caracas: Compañía Anónima Metro de Caracas
- Campbell, D. T. (1969) Reform as experiments. *American Psychology*, **24**, 409-29
- Christaller, W. (1933) *Die Zentralen Orte in Sudeutschland*, Jena. English translation by C. W. Baskin (1966): *Central Places in Southern Germany*. Englewoods Clifs, NJ: Prentice Hall
- Clark, C. (1951) Urban population densities. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A*, **114**, 490-6
- Cochrane, R. A. (1975) A possible economic basis for the gravity model. *Journal of Transport Economy and Policy*, Vol 5, No 1

- Converse, P. (1949) New laws of retail gravitation. *Journal of Marketing*, **14**, 279-304
- Daganzo, C. F. (1980) Optimal sampling strategies for statistical models with discrete dependent variables. *Transportation Science*, **14**, 324-45
- Dale, H. M. (1977) Trip generation: what should we be modelling? En *Determinants of Travel Choice*, D. A. Henscher and Q. Dalvi. London: Saxon House
- de la Barra, T. (1980) *Proposición de un marco teórico, unificado y consistente para la simulación y evaluación de planes de uso del suelo y transporte*. PT9, Instituto de Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, Caracas
- de la Barra, T. y Pérez, B. (1985) Assymetry in some common assignment algorithms: the dispersion factor solution. *Environment and Planning B*, **13**, 293-304
- de la Barra, T., Echenique, M., Guendelman, J. y Quintana, M. (1974) *An Urban-Regional Model*. WP 78. Cambridge: Land Use and Built Form Studies
- de la Barra, T., Pérez, B. y Vera, N. (1983) *Estructuración Jerárquica de Modelos de Uso del Suelo y Transporte*. Instituto de Urbanismo, Universidad Central de Venezuela, Caracas
- (1984) TRANUS-J: Putting Large Models into Small Computers. *Environment and Planning B*, **11**, 87-101
- Dial, R. B. (1971) A probabilistic multi-path traffic assignment model that obviates path enumeration. *Transportation Research*, **5**, 43-111
- Dijkstra, E. W. (1959) A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, **1**, 269-71
- Domencich, T. y McFadden, D. (1975) *Urban Travel Demand: a Behavioural Analysis*, Amsterdam: North-Holland
- DROV (1976) *Master Plan for the Island*. Curaçao: Department of urban and Regional Development Planning and Housing (DROV)
- (1986) *Application of a Land Use-Transport Model to Curaçao*. Curaçao: Department of Urban and Regional Development Planning and Housing (DROV)
- Echenique, M. (1968) Urban Systems: Towards an Explorative Model. WP 7, Cambridge: Land Use and Built Form Studies
- Echenique, M., Crowther, D. y Lindsay, W. (1969) A spatial model of urban stock and activity. *Regional Studies*, **3**, 281-312
- Echenique, M., Feo, A., Herrera, R. y Riquezes, I. (1973) *A Disaggregated Model of Urban Spatial Structure*: Caracas. WP 8. Cambridge: Land use and Built Form Studies
- Echenique, M., Geraldès, P. y Williams, J. (1977) *Desarrollo de un modelo de uso del suelo y transportes*, Informe No. 2 para la Corporación Administrativa del Gran Bilbao. Cambridge: Applied Research of Cambridge Ltd
- FERROCAR (1987) *Estudio de Ruta y Demanda del Ferrocarril Caracas-Tuy Medio-Valencia-Puerto Cabello*. Caracas: Instituto Autónomo de Ferrocarriles del Estado

- Garin, G. A. (f 966) A matrix formulation of the Lowry model for intrametropolitan activity location. *Journal of the American Institute of Planners*, 32,361-4
- Goodall, B. (1972) *The Economics of Urban Areas*. London: Pergamon Press
- Hansen, W. G. (1959) How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25
- Herbert, J. y Stevens, B. H. (1960) A model for the distribution of residential activity in urban areas, *Journal of Regional Science*, 2, 21-36
- Hoyt, H. (1939) *The Structure and Growth of Residential Neighbourhoods in American Cities*. Washington DC: Federal Housing Administration
- Huff, D. L. (1962) A note on the limitations of the intra-urban gravity model. *Land Economics*, 38, 64-6
- (f963) *A probabilistic analysis of shopping centre trade areas*. *Land Economics*, 39, 81-90
- Isard, W. (1956) *Location and Space-Economy*, Cambridge, MA: MIT Press
- (1960) *Methods of Regional Analysis*. Cambridge, MA: MIT Press
- Kanafani, A. (1983) *Transportation Demand Analysis*. McGraw-Hill
- Kirwan, R. M. y Martin, D. B. (1970) *The Economic Basis for Models of the Housing Market*. CES WP 62. London: Centre for Environmental Studies
- Kuhn, T. S. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press
- Lakshmanan, T. R. y Hansen, W. G. (1965) A retail market potential model. *Journal of the American Institute of Planners*, 31, 134-43
- Leach, G. y Pellew, S. (f 982) *Energy Conservation in Housing*. London: International Institute for the Environment and Development/Science Reviews
- Le Blanc, L. J., Morlok, E. K. y Pierskalla, W. P. (1975) An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. *Transportation Research*, 9, 309-18
- Lee, C. (1973) *Models in Planning*. London: Pergamon Press
- Leontief, W. W. (1941) *The Structure of the American Economy 1919-1939*. 2a ed. 1951. New York: Oxford University Press
- Leontief W. W. y Strout, A. (1963) Multi-regional input-output analysis. En *Structural Interdependence and Economic Development*, edit. Barna. London: McMillan
- Lösch, A. (1940) *Die Raumliche Ordnung der Wirtschaft*, Jena. Traducción al ingles por W. H. Woglom y W. F. Stolper (1954): *The Economics of Location*. New Haven: Yale University Press
- Lowry, I. S. (1964) *A Model of Metropolis*. Santa Monica, CA: Rand Corporation
- (1968) *Models of urban development*. En *Urban Development Models*, editado por G. Hemmens. Special Report 97. Washington DC: Highway Research Board

- Luce, R. D. (1959) *Individual Choice Behaviour*. New York: John Wiley
- McGill, S. M. (1977) The Lowry model as an input--output model and its extention to incorporate full intersectorial relations. *Regional Studies*, **11**, 337-54
- Mclaughlin, W. A. (1965) *Multi-path System Traffic Assignment Algorithm*. Research Report RB 108. Ontario: Department of Highways
- Malisz, B. (1969) Implications of threshold theory for urban and regional planning. *Journal of the Town Planning Institute*, **55**, No. 3
- March, L. (1972) Citado en *Urban Systems Study, Demonstrations and Seminars*. Cambridge: Land Use and Built Form Studies
- Marx, C. (1847) Misere de la philosophie, Paris. Extracts from Karl Marx, *Selected Writings in Sociology and Social Philosophy*, edited by T. B. Bottomore y M. Rubel (1961). C. A. Watts and Co Ltd
- Masser, I. (1969) *A Test of Some Models for Predicting Intermetropolitan Movement of Population in England and Wales*. UWP 9. London: Centre for Environmental Studies
- Mayberry, J. P. (1970) Structural requirements for abstract-mode models of passenger transportation. En *The Demand for Travel: Theory and Measurement*, editado por R. E. Quant. Lexington, MA: Heath Lexington Books
- Mills, E. S. (1969) *Studies in the Structure of the Urban Economy*. Baltimore: Johns Hopkins Press
- MINDUR (1986) *Instalación de un sistema de Modelos y su Aplicación a La Victoria*, El Concejo y Tejerías. Caracas: Ministerio de Desarrollo Urbano
- Moore, E. F. (1963) The shortest path through a maze. *Proceedings, International Symposium on the Theory of Switching*. Cambridge, MA: Harvard University Press
- MTC (1986) Estudio de la Demanda de Transporte de la Autopista Caracas la Guaira. Caracas: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
- (1987) Solicitud de Préstamo al Banco Interamericano de Desarrollo-Subprograma Autopistas. Caracas: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
- Murchland, I. D. (1969) *The 'Once Through' Method of Finding All Shortest Distances in a Graph from a Single Origin*. LBS-TNT-56, **1**. PATRAC
- Muth, R. F. (1958) Urban residential land and housing markets. En *Issues in Urban Economics*, editado por H. S. Perloff y L. Wingo. Baltimore: Johns Hopkins Press
- (1969) *Cities and Housing*. Chicago: University of Chicago Press
- Owens, S. (1986) *Energy, Planning and Urban Form*. London: Pion
- Penz, F. (1983) *Passive Solar Heating in Existing Dwellings: a Study of Potential in the Existing Housing Stock of the United Kingdom*. Cambridge: The Martin Centre for Architectural and Urban Studies
- Popper, K. R. (1963) *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. London: Routledge and Kegan Paul

- (1966) *The Open Society and its Enemies*. London: Routledge and Kegan Paul
- (1972) *Objective Knowledge: An Evolutionary Approach*. London: Oxford University Press
- Putman, S. H. (1973) *The Interrelationships of Transport Development and Land Development*. University of Pennsylvania, Philadelphia: Department of City and Regional Planning
- (1975a) Urban land use and transportation models: a state of the art summary. *Transportation Research*, 9, 787-202
- (1975b) *Further results from, and prospects for future research with, the Integrated Transportation and Land Use Model Package (ITLUP)*. Paper presentado en la Annual Conference of the Southern Regional Science Association. Atlanta. Georgia
- (1975c) *Calibrating a Disaggregated Residential Allocation Model -DRAM: the residential sub-model of the Integrated Transportation and Land Use Model Package (ITLUP)*. Paper presentado en la Regional Science Association, British Section, 8th Annual Conference. London
- Reilly, W. J. (1931) *The law of retail gravitation*. New York: Putman and Sons
- Rickaby, P. y de la Barra, T. (1987) *A theoretical comparison of strategic spatial options for city-regional development, using the TRANUS model*. Paper presentado en la Conferencia: Models for Strategic Energy Decisions in an Urban and Regional Context, Stockholm
- Rogers, A. (1958) *Matrix Analysis of Inter-Regional Population Growth and Movement*. University of California Press
- SELNEC Transportation Study (1971) *The Mathematical Model*. Technical Working Paper No. 5. Town Hall, Manchester
- (1972) *Calibration of the Mathematical Model*. Technical Working Paper No. 7. Town Hall, Manchester
- Senior, M. L. (1977) Problems in the integration of land use/transportation models. En *Urban Transportation Modelling*, editado por P. Bonsal, Q. Dalvi and P. Hills. [ondon: Abacus Press
- Shorheed, J. H. y Wilson, J. (1968) *A Minimum Path Algorithm*. Unpublished Report, Department of Civil Engineering, University of Waterloo. Ontario
- Stewart, J. (1948) Demographic gravitation: evidence and applications. *Sociometry* 11 (Feb.-May)
- Stoneman, C. A. (1972) Shortest route through a road network. Technical Notes, *Series .4: Computer Topics in Planning*, No. 8. Cambridge: Land Use and Built Form Studies
- Supernak, J. (1983) Car availability versus car ownership modelling: theoretical discussion and empirical findings. *Proceedings of the World Conference on Transport Research*, Hamburg, Germany
- UMTA (1977) UTPS Reference Manual. US Urban Mass Transit Administration

- Van Valkenburg, M. E. (1974) Prefacio de *An Introduction to Discrete systems*, por K. Steiglitz. New York: Wiley
- Von Thünen, I. H. (1826) *Der Isolierte staat in Beziehung auf landwirtschaft und Nationalöconomie*, Hamburg. Traducido al inglés por C. M. Wartenberg (1966), editado por P. Hall. Von Thünen's Isolated State. London: Pergamon Press
- Wardrop J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research. Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part II, **1**, 325-78
- Weber, A. (f 909) *Über den Standort der Industrien*, Tübingen. Traducción al inglés con introducción y notas por C. J. Friedrich (1929), Alfred Weber's Theory of the Location of Industries. Chicago: University of Chicago Press
- Williams, H. C. W. L. (1977a) On the formulation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. *Environment and Planning A*, **9**, 285-344
- (1977b) Generation of consistent travel demand models and user-benefit measures. En *Urban Transportation Planning*, editado por P. Bonsall, W. Dalvi y P. Hills. London: Abacus Press
- Wilson, A. G. (1967) A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research*, **1**, 253
- (f 970) *Entropy in Urban and Regional Modelling*. London: Pion
- (1974) *Urban and Regional Models in Geography and Planning*. Chichester: John Wiley
- Wilson, A. G., Hawkins, A. G., Hills, G. f. y Wagon, D. I. (1969) Calibrating and testing the SELNEC transport model. *Regional Studies*, **3**, 332-50
- Wingo, L. (1961) *Transportation and Urban Land*. Baltimore: Johns Hopkins Press
- Wootton, H. f. y Pick, G. W. (1967) A model for trips generated by households. *Journal of Transport Economics and Policy*, **1**, 137-53
- Zipf, G. K. (1949) *Human Behaviour and the Principle of Least Effort*. Cambridge, MA: Addison-Wesley