



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROPUESTA METODOLÓGICA Y APLICACIÓN DEL MODELO GRAVITACIONAL EN LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA DE SISTEMAS – TRANSPORTE

P R E S E N T A :

HÉCTOR DANIEL RESÉNDIZ LÓPEZ



TUTOR:
DR. LUIS CHIAS BECERRIL

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. José de Jesús Acosta Flores

Secretario: Dr. Ricardo Aceves García

Vocal: Dr. Luis Chias Becerril

1er suplente: Dra. Mayra Elizondo Cortes

2do suplente: Dra. Idalia Flores de la Mota

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Luis Chias Becerril

FIRMA

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	iii
1. MARCO TEÓRICO DEL ANÁLISIS ESPACIAL Y SU RELACIÓN CON EL SECTOR TRANSPORTE	
1.1 Interacciones espaciales.....	1
1.2 Teorías para el análisis espacial de las interacciones.....	5
Teoría centro-periferia.....	5
Teoría de los lugares centrales.....	6
Teoría de difusión espacial.....	10
Teoría de localización.....	13
1.3 Los Sistemas de Información Geográfica, definición y utilidad para el análisis de sistemas de transporte.....	22
Definición, componentes y funciones de los SIG.....	22
Aplicaciones de los SIG en distintos sectores.....	28
Importancia de los SIG T.....	28
Contribución de los SIG T en la cadena de valor.....	31
El uso de los SIG T para modelar el espacio en el transporte.....	33
2. MODELOS PARA EL ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS	
2.1 Antecedentes y Teoría de los Grafos.....	36
Gradiente espacial.....	36
Teoría de los grafos.....	40
2.2 Modelos de interacción y análisis espacial.....	47
Enfoques en la modelación de las interacciones espaciales.....	47
Modelos de posición.....	50
Modelos de interacción espacial.....	57
3. EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS A TRAVÉS DEL TRANSPORTE	
3.1 Utilidad del modelo gravitacional en estudios del transporte.....	64
Antecedentes.....	64
El modelo gravitacional en estudios de interacción para el transporte.....	67
3.2 Mejoras y variaciones en el modelo gravitacional.....	101
Incorporación de pesos para jerarquizar variables.....	101
Modelo gravitacional de Kolars y Malin para la simulación y construcción de redes.....	102
Modelo gravitacional de distribución de viajes.....	106
Estructura general de una matriz O-D para aplicar el modelo gravitacional Compuesto.....	116
4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO	
4.1 Antecedentes del estudio de caso: Aeropuerto Internacional de Toluca.....	119

Recomposición de la oferta.....	124
Recomposición de la demanda.....	126
4.2 Delimitación del área de estudio.....	127
Cálculo de las áreas de influencia de cada aeropuerto.....	128
Reasignación de municipios con aeropuertos en competencia.....	135
Área de servicio del AICM.....	137
Área de servicio del AIT.....	138
4.3 Evaluación del mercado potencial de usuarios.....	140
Resultados de la encuesta SCT.....	141
Resultados de la encuesta UNAM.....	142
Localización de usuarios según su perfil.....	146
4.4 Propuesta metodológica para la descentralización de pasajeros hacia el AIT.....	147
Planteamiento de la interacción.....	147
Tipo de modelo y selección de variables.....	148
Modelación de las interacciones con la teoría de grafos en el SIG.....	151
Interpretación y representación de resultados obtenidos: contornos de Isoprobabilidades.....	166
Diseño de rutas de transporte utilizando el índice de interacción gravitacional y la jerarquía de segmentos de la red óptima.....	174
 CONCLUSIONES.....	 187
 BIBLIOGRAFÍA.....	 195
 ÍNDICE DE FIGURAS, GRÁFICAS Y TABLAS.....	 203

INTRODUCCIÓN

En los últimos veinte años hemos asistido a un cambio (proceso de globalización) que me atrevería a calificar de estructural (no coyuntural) sustentado en dos sectores tecnológicos estratégicos, la telemática y los transportes. La sinergia entre estos dos componentes y su actuación en el marco de la política mundial, está transformando la forma de interactuar de nuestra sociedad entera en un ambiente en el que muchas transacciones se hacen de manera virtual (vía Internet).

Sin embargo, y pese a que frecuentemente se habla del comercio sin fronteras e incluso de la “muerte de la distancia” y de que la tecnología reduciría un gran número de viajes (sobre todo de personas, gracias al don de la ubicuidad que se da a través de la red de redes en tiempo real), las estadísticas mundiales siguen registrando incrementos significativos en el número de viajes realizados tanto de personas como de mercancías y la atención de dicha demanda sigue siendo un tema relevante de estudio para disciplinas como la economía, la ingeniería y la geografía.

En el marco académico se reconoce que la mayoría de los problemas responden a situaciones complejas que demandan conceptos y herramientas que permitan el análisis multicriterio. El conocimiento estadístico, matemático, económico y geográfico (físico y humano) individualmente es necesario pero no suficiente para entender y mejorar las relaciones socioeconómicas y ambientales (cuantitativas y cualitativas). Sólo con la unificación de estos conocimientos se configura el sentido y desarrollo de este trabajo que ahora presento como tesis.

Otro aspecto fundamental derivado del proceso de globalización, es la cuestión ambiental, y por ende el gran interés por analizar casi todo con una perspectiva territorial: el espacio y las autoridades actuando en marcos jurídico administrativos a distintas escalas, disponen actualmente de una amplia gama de instrumentos de actuación en el ámbito social y económico, por lo que, la política o enfoque regional se adopta frecuentemente como marco de referencia, sin perjuicio de que se pueda trabajar e incidir sobre unidades espaciales de menor o mayor rango.

La propia política económica ha visto modificada su actuación focalizándose paulatinamente en una concepción cada vez más horizontal que sectorial, el énfasis se pone ahora en la formación profesional, el estímulo a los programas de investigación y desarrollo, la mejora de la infraestructura y la disponibilidad de servicios avanzados sumamente competitivos. Además, cada vez es mayor la posibilidad de realizar políticas y programas regionales eficaces y ajustados a las características del tejido socioeconómico de cada región mejorando notablemente su funcionamiento espacial.

Un ejemplo claro de la acción pública puesta a prueba por acciones político- regionales, es el fracasado intento de construir un nuevo Aeropuerto Internacional para la Ciudad de México. Como se sabe, el actual funcionamiento e importancia de esta terminal aérea rebasa con mucho a la Ciudad de México, pues en realidad es el aeropuerto de toda la Región Centro y quizá del país, no sólo por el porcentaje de servicios aéreos que atiende,

pues la capital ha organizado y seguramente lo seguirá haciendo por determinado tiempo, la estructura y funcionalidad de los servicios aéreos en México.

Sin embargo, al cancelarse la posibilidad de construir el nuevo AICM, el gobierno federal está implementando una “política de descentralización de los servicios aéreos de pasajeros” y con ese fin evalúa el mercado potencial de los aeropuertos que se encuentran dentro de la Región Centro. Lo que ha dado lugar a una gran cantidad de estudios, sobre la demanda, factibilidad, costo beneficio, etc., de las distintas terminales que podrían absorber parte de los vuelos que actualmente está ofreciendo el AICM. El objetivo del presente trabajo es presentar parte de un estudio de gran visión, que se realizó dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México con el fin de promover la descentralización de los servicios de pasaje aéreo, focalizando la atención en la planeación de rutas de transporte público utilizando el Modelo Gravitacional de Interacción con el apoyo técnico de un sistema de Información Geográfica (SIG) para el cálculo, mapeo e interpretación de resultados.

Para cumplir con el objetivo de la tesis, fue necesario concretar de manera consecutiva los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar las bases conceptuales de los modelos de interacción espacial.
- Definir el marco teórico del modelo gravitacional y construir la conexión entre la planeación del transporte y las teorías de interacción socioeconómica.
- Determinar las variables que caracterizarán los patrones de viajes de la población y que se involucrarán en la toma de decisión.
- Describir las metodologías para llevar a cabo los procesos.
- Plantear los mecanismos para utilizar el modelo gravitacional con aplicaciones en transporte.
- Demostrar la utilidad práctica en el caso concreto de la zona de influencia del aeropuerto de Toluca, Estado de México.

Actualmente, las tecnologías de información (TI) y el análisis espacial cada vez adquieren mayor importancia en los procesos de toma de decisión, tanto en el sector público como el privado. La ingeniería del transporte por su parte, desde sus inicios utiliza modelos matemáticos como soporte en el proceso de planeación, por su utilidad en el análisis de sistemas complejos y capacidad para generar soluciones orientadas a la toma de decisiones. Ambas tendencias vienen reforzadas por el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica, que incorporan Modelos de Interacción Espacial (MIE) sobre mapas digitales, conjuntando herramientas que ayudan a la predicción del comportamiento espacial de consumidores, la localización de lugares de ventas y de servicios, la delimitación de áreas de mercado, el análisis del desempeño de los mercados, la simulación y el pronóstico de ventas, etcétera.

Sin embargo, la tecnología SIG está limitada a sólo cierto perfil de usuarios por tres razones que implican:

- Contar con personal técnico altamente capacitado.
- Contar con el hardware y las licencias de uso, en muchas ocasiones costosas.
- La cantidad y formato de las variables de entrada obtenidas en los estudios de transporte son difíciles de implementar en un modelo si se carece del marco

conceptual necesario para combinar los requerimientos de los proyectos de transporte con las herramientas de análisis espacial de los SIG.

Por esta razón, consideramos que entre las contribuciones del presente trabajo, destaca la aportación de una metodología utilizando los Sistemas de Información Geográfica que permita construir modelos que evalúen la interacción espacial para la solución de problemas específicos como ocurre en el caso de los sistemas de transporte.

Partimos de la hipótesis que indica que es factible lograr la descentralización de los servicios aéreos de pasajeros en el AICM. También consideramos que además de la voluntad política y de las condiciones requeridas de financiamiento para llevar a cabo este programa, se requiere conocer con relativa precisión la demanda potencial de los consumidores, no sólo numéricamente, sino también espacialmente y con ese fin utilizamos el modelo gravitacional, el análisis espacial y los sistemas de información geográfica.

El modelo gravitacional de interacción, basado en la analogía de la teoría de Newton de la atracción universal, ha encontrado una amplia aplicación en distintas ramas de la ciencia. Este modo de interpretar las formas del modelo está basado principalmente en el supuesto de que entre las características dimensionales de las magnitudes elementales –la masa y la distancia- del sistema físico y del socioeconómico, existe un isomorfismo, gracias a que se establecen las magnitudes secundarias analógicas, tales como la energía y el potencial gravitacional.

La analogía de la ecuación de la gravitación no es un intento de generalización, sino contempla una situación de investigación concreta. Al mismo tiempo indica que pueden existir muchos modos de transformar el modelo gravitacional con el fin de crear un instrumento adecuado para diversos estudios empíricos. El planteamiento original de David Huff, con el enfoque explicativo-estocástico, utiliza modelos probabilísticos de elección que permiten la introducción y estudio de nuevas variables influyentes en las interacciones relativas al punto de origen y de destino, desarrollado a mediados de los años sesenta, ha resistido el paso del tiempo –más de 40 años, lo que refleja su importancia y utilidad hasta la fecha. Huff ha sido pionero en la aplicación del modelo gravitacional utilizando los SIG pues actualmente su uso es extenso entre los analistas de negocios, gobierno y académicos. La longevidad y actualidad del modelo de gravitación se atribuye a su comprensibilidad, fácil uso y amplio rango su aplicabilidad en problemas diversos. Es conceptualmente lógico y sus salidas pueden entenderse y comunicarse fácilmente, es operacional debido a que los cálculos necesarios son directos una vez que los valores de las variables y los parámetros han sido especificados. Sin embargo, a pesar de la aplicabilidad general del modelo, no siempre ha sido empleado correctamente y su capacidad máxima todavía está por definirse.

En la modelación de las interacciones, la fidelidad en el planteamiento de cualquier sistema que intente analizar el comportamiento espacial está basado en la exactitud de las ecuaciones que son utilizadas para describir la atracción que ejerce cada elemento del sistema. Las ecuaciones de atracción deben estar basadas en los datos disponibles y deben describir un comportamiento observable.

Para desarrollar la investigación se ejecutaron las siguientes acciones en un proceso metodológico de retroalimentación:

- Revisión del estado del arte del tema para determinar el marco conceptual. Se consultaron diversas fuentes como: tesis publicadas en universidades de nuestro país y extranjeras, artículos y trabajos de investigación y bibliografía especializada.
- Estructuración de los capítulos y subcapítulos mediante la ayuda de diagramas conceptuales, estructurales y funcionales.
- Análisis de estudios de caso similares en diversas fuentes: publicaciones, artículos, tesis, manuales de software y recursos en Internet.
- Integración del cuerpo capítular del trabajo.
- Generación de hojas de cálculo, diagramas, gráficos y mapas para elaborar los ejemplos.
- Documentación sobre los algoritmos espaciales y funciones analíticas para el análisis de redes en SIG, con su posterior aplicación práctica en los diversos modelos estudiados en el trabajo.
- Desarrollo del modelo gravitacional de interacción utilizando como plataforma un sistema de información geográfica.
- Aplicación del modelo gravitacional en un estudio de caso concreto.
- Reflexión de alcances y limitaciones del estudio.

Para presentar los resultados de la tesis se organizó la información en la siguiente estructura capítular:

En el capítulo 1 se presentan los fundamentos de los Modelos de Interacción Espacial analizando los conceptos básicos de la teoría general del análisis espacial y su vinculación natural con el transporte. Estas teorías intentan explicar la localización y distribución de las actividades humanas, el importante papel que desempeña la distancia/tiempo y las características físicas del territorio (relieve, clima, suelo, vegetación, hidrología, etc.), elementos clave requeridos para la modelación matemática de las interacciones espaciales pues estos elementos frenan las interacciones y jerarquizan los lugares en función de su situación.

En el capítulo 2 se construye el marco conceptual para cumplir el objetivo del trabajo. Esta tarea implicó estudiar la consistencia teórica y práctica de varios modelos espaciales como el método de las isodápanas (Weber) para la optimización de los costos de transportación en la industria, el punto de ruptura (Converse) para la delimitación de fronteras de mercado, el índice de potencial de interacción socioespacial (Stewart y Zipft) para núcleos determinados y el índice de interacción gravitacional (Reilly, Huff y otros) para establecer jerarquías en un sistema espacial.

En el capítulo 3 se expone el trabajo de diversos investigadores sobre la aplicación del modelo gravitacional a la teoría del transporte –que particularmente en el transporte urbano, ha sido substancial. Esto no quiere decir que los problemas teóricos y prácticos de la ingeniería del transporte y del análisis espacial se han resuelto completamente y mucho menos que exista una herramienta perfecta para estimar los patrones de distribución de

viajes. Pero sí demuestra que existen diversas maneras de abordar dichos problemas y presentar alternativas para indagar su solución. Esta parte del trabajo se orienta a explicar los modelos de interacción espacial de tipo gravitacional, su funcionamiento, variables requeridas y mejoras. Se presentan y analizan diversas metodologías para valorar la distribución de la demanda de transporte y los índices de interacción entre un conjunto de localizaciones. Esta información es útil para la etapa de planeación de los transportes, pues busca establecer relaciones existentes entre los viajes y las medidas de atracción, generación y resistencia al viaje. Además los resultados son útiles para el proceso de programación de vehículos a lo largo de rutas.

En el capítulo 4 se aplica el conocimiento adquirido en un caso de estudio concreto: “El modelo gravitacional como herramienta para la planeación de rutas de transporte público”. Desde el planteamiento del problema hasta su solución, se hace uso de diversos modelos espaciales incluido por supuesto, el de interacción gravitacional, con el fin de exponer y contribuir al conocimiento teórico y práctico de la ingeniería de transporte con esta metodología.

Antes de concluir la introducción quiero manifestar mi agradecimiento a la División de Estudios Profesionales de la Facultad de Ingeniería, en especial a la Coordinación de Transporte, por la posibilidad que me brindó de realizar mis estudios de maestría sobre este sector que considero cumple una función estratégica para el desarrollo social, económico y ambiental de nuestro país. Al CONACYT por la beca que me otorgó durante el periodo 2004-2005 y al Instituto de Geografía que me alojó durante mi periodo de investigación y me proporcionó las herramientas técnicas y el conocimiento tecnológico en materia de Sistemas de Información Geográfica. En particular agradezco la generosidad de mis maestros y compañeros de trabajo, en especial al Dr. Luis Chías Becerril y al Dr. Ricardo Aceves García, a los Geógrafos Anuar y Armando Martínez, al Dr. Juan Carlos García Palomares y al Mtro. Tonatiuh Suárez Meaney. Su contribución conceptual en este trabajo fue determinante para el cumplimiento de sus objetivos.

Por otra parte, el trabajo presentado se debe al apoyo incondicional de mi familia por lo que les agradezco profundamente, en especial a Pili, Oscar y Nayeli. Sin olvidar a mis amigos y compañeros de trabajo: Leo, Lulú, Brenda, Blanca, Adriana, Marisol, Oscar...

1

MARCO TEÓRICO DEL ANÁLISIS ESPACIAL Y SU RELACIÓN CON EL SECTOR TRANSPORTE

Objetivo: Revisar los conceptos básicos de la Teoría General del Análisis Espacial y establecer la conexión y utilidad que tienen para la ingeniería del transporte en general y del estudio de caso en particular.

La teoría general del análisis espacial propone una explicación sobre el estado y la evolución probable de las unidades territoriales, a partir del conocimiento de su contexto en relación con otras unidades territoriales. Actualmente existen varias proposiciones teóricas que han sido enriquecidas progresivamente, con el fin de explicar la localización y la distribución de las actividades humanas (entre ellas destaca el transporte) y el importante papel que desempeña la distancia y las características físicas del territorio (relieve, clima, suelo, vegetación, hidrología, etc.), las cuales estimulan o frenan las *interacciones* y jerarquizan los lugares en función de su privilegiada o negativa *situación*¹.

1.1 Interacciones espaciales

Antes de entrar de lleno a la explicación de las teorías, es conveniente definir lo que es la interacción espacial. Este concepto se define como un *movimiento* observado de entidades (puede ser de personas, carga, información, etc.). Una definición frecuente en la literatura reduce la noción de interacción espacial al fenómeno de decrecimiento de los flujos con la distancia.

Los movimientos están en función de varios factores como: el tiempo de recorrido, el costo económico por desplazamiento y las relaciones oferta-demanda (bienes, servicios,

¹ El término *situación* se refiere a una localización relativa en el espacio que es definida por las relaciones tanto con su entorno próximo y lejano. Depende de la ubicación con respecto a otros lugares similares o complementarios, y en consecuencia del estado de las diferentes redes que le aseguran las relaciones con éstos.

empleos, etc.). Los flujos también están influenciados por factores tales como: el nivel de servicio de las vialidades, el estado físico de las mismas, la pendiente del camino, el índice de rodeo de las posibles rutas, las toneladas de carga máximas permisibles por la vialidad, las barreras físicas, políticas y socioeconómicas, la velocidad, economía y comodidad de los servicios y modos de transporte, etcétera. Los flujos pueden ser medidos mediante diversas técnicas, como el número de viajeros observados o el tonelaje de mercancías registrado por día en un aforo, el tránsito diario promedio anual, el ingreso por peaje al circular en autopistas, o inclusive el número de llamadas telefónicas entre las zonas analizadas. Conceptualizar las interacciones espaciales tiene como fin proporcionar métodos para medir los flujos y predecir las consecuencias de cambios en las condiciones que los generan. Cuando estos atributos son conocidos, es posible asignar de manera óptima los recursos del transporte.

Existen diversos tipos de interacciones espaciales, las más conocidas son la atracción, generación y resistencia.

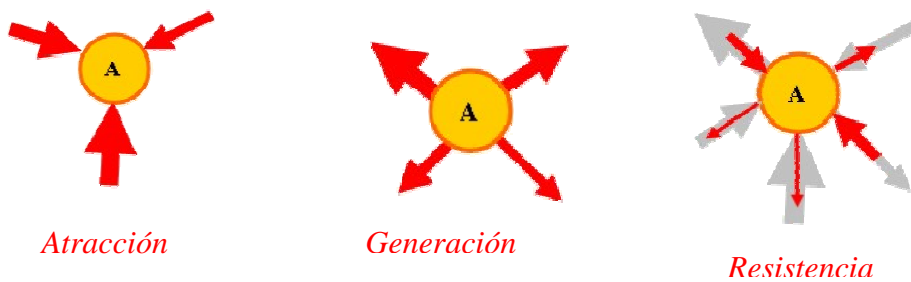


Figura 1.1. Algunos tipos de interacciones espaciales.

Fuente: elaboración del autor.

Como se muestra en la figura anterior (1.1), una forma de representación de los elementos que integran las interacciones espaciales es mediante grafos². Dos zonas geográficas (I y J) pueden ser representadas mediante centroides o elementos puntuales (i y j). Un vector o elemento lineal, representa el flujo entre los dos centroides.

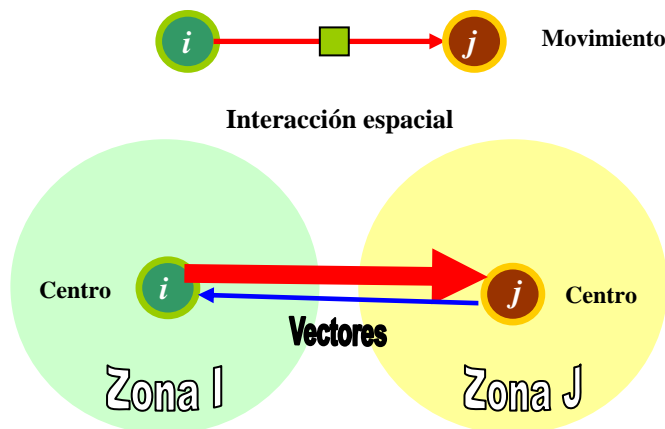


Figura 1.2 Representación vectorial de una interacción espacial.

Fuente: elaboración del autor.

La noción de interacción espacial puede señalar la existencia de relaciones causales en el espacio, es decir, lo que pasa en un lugar ejerce una influencia sobre lo que pasa en los

² En el capítulo 2 se explica la teoría de los grafos.

otros lugares y varía en función de su proximidad. La existencia de procesos de difusión espacial resulta un buen ejemplo, cuando aparece una innovación en un lugar existen fuertes posibilidades de propagarse hacia los lugares próximos, ya sea que la proximidad se mida de modo continuo o jerárquico, y aún con la existencia de formas de autocorrelación espacial, que es el hecho de que dos lugares próximos se parecen más que dos lugares alejados.

Para que la interacción espacial se presente, son necesarias tres condiciones interdependientes:

- a) **Complementariedad.** Debe existir una relación oferta/demanda entre las unidades que interactúan. Por ejemplo, una zona residencial es complementaria a una zona industrial debido a que la primera aporta trabajadores, mientras que la segunda aporta empleos. Lo mismo puede decirse sobre la complementariedad entre una tienda y sus consumidores y entre la industria y sus proveedores. En la figura 1.3 se muestra que si la localidad B produce algo que la localidad A requiera, entonces la interacción es posible debido a que la relación oferta/demanda se ha establecido entre esas dos localidades. Lo mismo ocurre en la otra dirección (de A a B), lo que crea una situación de reciprocidad, que es muy común en el comercio.

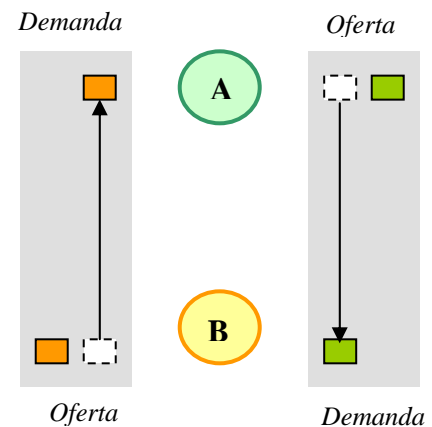


Figura 1.3. Relación oferta/demanda.

Fuente: elaboración propia.

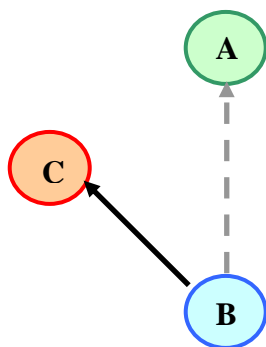


Figura 1.4. Representación de la existencia de una oportunidad alternativa: la interacción entre B y A no se realizará si existe una mejor opción para B (en este caso C).

Fuente: elaboración propia.

- b) **Oportunidad alternativa.** No debe existir otra unidad que pueda ofrecer una mejor alternativa como punto de origen o como punto de destino. Por ejemplo, para tener una interacción de un consumidor con una tienda, no debe existir otra tienda más cercana que ofrezca mercancías similares. Por ejemplo, en la figura 1.4 se observa que si una tienda C ofrece las mismas características que la tienda A y también es más cercana a la tienda B, la interacción entre B y A no ocurrirá y será reemplazada por la interacción entre B y C.

- c) **Transferabilidad.** La carga, personas o información a transferir debe ser apoyada por infraestructura y su correspondiente servicio de transporte. Los costos para superar la distancia no deben ser muy altos, aún si existe complementariedad y no hay oportunidad alternativa. Por ejemplo, en la figura 1.5 se observa que el sistema de transporte (modos y terminales) debe estar presente para soportar una interacción entre *B* y *A*. Es de hacer notar que la infraestructura y los servicios de transporte deben tener una capacidad y disponibilidad compatible con los requerimientos de dicha interacción.

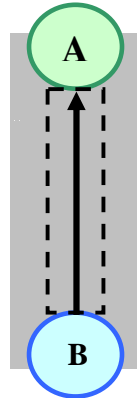


Figura 1.5. Transferabilidad mediante transporte adecuado. La línea punteada indica el modo y el servicio. El área sombreada la infraestructura. La interacción no se podría llevar a cabo en caso de prescindir de alguno de estos elementos. Fuente: elaboración propia.

Interacción espacial y relación social

Cuando se pretende describir fenómenos sociales con la ayuda de leyes globales del comportamiento humano se encuentran varias dificultades ya que las relaciones entre lugares (ya se trate de ciudades, regiones, etcétera), se refieren en efecto a agregados sociales o económicos, la mayoría de las veces heterogéneos, compuestos por individuos (personas, empresas, etc.) que no disponen de los mismos ingresos, de las mismas capacidades de movilidad, ni de la misma información sobre las oportunidades de relación.

Los modelos de interacción espacial postulan agregados sociales y económicos constituidos por un comportamiento medio que permite resumir el de los individuos que componen estos agregados. A causa de esto, los modelos de interacción espacial plantean una independencia relativa de los determinantes espaciales de la interacción (atributos de localización de los individuos y de los grupos) con respecto a otros determinantes sociales o económicos (atributos individuales o colectivos independientes de la posición espacial). Por ello al utilizar estos modelos se corre el riesgo de imputar efectos que no corresponden a la realidad del sistema y de producir relativa confusión en la interpretación de los fenómenos.

Sin embargo, antes que considerar a los fenómenos de interacción espacial como componentes exógenos del comportamiento social, parece más interesante comprender, que constituyen una resultante global de gran valor analítico.

Las justificaciones más pertinentes de los modelos de interacción espacial son precisamente las que desmitifican el efecto de la distancia y vinculan su influencia con los procesos económicos (Reilly, 1931), sociológicos (Stouffer, 1940) o cognitivos (Hägerstrand, 1953).

1.2 Teorías para el análisis espacial de las interacciones

El conjunto de teorías que se estudiaron en este trabajo para relacionar, enriquecer e integrar el análisis espacial con la planeación de los transportes son:

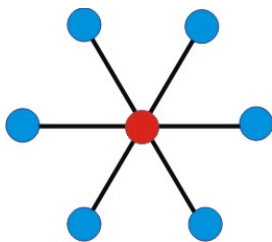
- *Centro - Periferia,*
- *Lugares centrales,*
- *Localización.*
- *Difusión espacial de las innovaciones*

Estas teorías fueron recopiladas con la intención de crear un marco de referencia para la modelación de las interacciones y cada una de ellas busca explicar el funcionamiento y evolución de diversos sistemas espaciales. El orden en que se abordan las teorías es intencional, pues son progresivas, es decir, la anterior es base para desarrollar la siguiente.

A partir de los enunciados de estas teorías, diversos autores han desarrollado modelos para interpretar el comportamiento de las variables que conforman un sistema espacial en problemas específicos de transporte, por citar un ejemplo, existen modelos para analizar el alcance del mercado de un producto en función del costo de transportación, el cual no debe rebasar el costo de producción.

La importancia principal de estudiar estos modelos es comprender su funcionamiento y la naturaleza del tipo de información que utilizan para llegar a realizar enunciados propios hechos a la medida de los problemas en cuestión con el fin de cumplir los objetivos de nuestro estudio. Cuando se aplica el enfoque matemático necesario para la modelación sobre las teorías analizadas, que tienen como esencia el estudio del territorio, se obtienen resultados que sin lugar a duda son interesantes para los profesionistas que no cuentan con esta formación. El uso de los sistemas de información geográfica permite realizar esta vinculación en forma natural.

Teoría centro-periferia



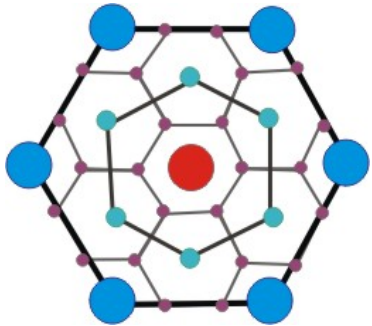
Los términos centro y periferia se usan frecuentemente para describir la oposición entre los dos tipos fundamentales de lugares en un sistema espacial: el que domina y saca provecho de su posición, el centro; y los que los sufren por su ubicación periférica. Esta pareja conceptual se remonta por lo menos a Werner Sombart (1916) y fue utilizada por los teóricos del imperialismo (Luxemburg, 1951; Boukharine, 1967), pero los economistas de las desigualdades de desarrollo son los que le dieron su forma contemporánea (Amin, S., 1973). Alain Reynaud (1981) desarrolló la noción en la disciplina geográfica. Estos autores exponen que para que la interacción espacial tenga sentido, es necesario que existan relaciones entre los dos tipos de lugares, es decir flujos (de personas, de mercaderías, de capitales, de informaciones, de decisión, etc.), y que estas relaciones sean disimétricas, es decir, la existencia de un saldo desequilibrado de flujos de distinta jerarquía en las relaciones de poder. El centro adquiere mayor jerarquía

justamente porque saca provecho de esta desigualdad y recíprocamente, las periferias se caracterizan por un déficit que las mantiene en su posición de dominadas.

Los sistemas centro-periferia son autorregulados: el centro reproduce tanto las condiciones de su centralidad, como las de su periferia. Estos sistemas son dinámicos, justamente porque están fundados sobre una lógica de intercambio desigual. Si ciertas periferias llegaran a volverse ángulos muertos son abandonadas, otras sin embargo, pueden beneficiarse al cambiar situación ya sea por su ventaja en tamaño o la posición de contacto con el exterior del sistema espacial. Esto puede implicar inversiones de polaridad en una lógica que permanece globalmente idéntica, o bien, cambios de sistemas.

La teoría centro/periferia tiene una robusta capacidad heurística, con la condición de que no debe ser trivializado excesivamente. Conviene reservar su uso para la formalización de un sistema fundado sobre las relaciones de desigualdad y no utilizarlo como una simple descripción de gradientes o diferenciación espaciales.

Teoría de los lugares centrales



Walter Christaller (1935) desarrolló esta teoría para explicar el tamaño y espaciamiento de las ciudades especializadas en la venta de bienes y servicios, argumentando que la importancia de una localidad no está dada únicamente por su población.

La teoría consiste en dos conceptos básicos: el *umbral*, que es el mercado mínimo (población o ingreso) necesario para proporcionar los bienes o servicios en existencia y mantener el negocio y el *alcance*, que es la distancia máxima promedio que los consumidores están dispuestos a viajar para adquirir los bienes y servicios, ya que a cierta distancia del centro el costo o inconveniencia es mayor que la necesidad del bien y por lo tanto buscarán acceder a otro punto de oferta que implique menores costos y en consecuencia menores precios (Christaller asumió que el comportamiento de los consumidores es racional en términos económicos, es decir buscan maximizar su utilidad). Esta circunstancia abre la posibilidad para que nuevos empresarios entren al mercado, siempre y cuando identifiquen localizaciones que les reporten dos ventajas básicas: ganar mercado a la competencia y alcanzar umbrales suficientes para hacer viables sus propios negocios.

Para el desarrollo de esta teoría, Christaller se basó en las siguientes premisas con el fin de simplificar la información:

- Superficie isótropa y limitada.
- Población y recursos uniformemente distribuidos.
- Todos los consumidores cuentan con un poder de compra similar.
- Ningún proveedor de mercancías o de servicios puede ganar beneficios excesivos.
- Existe únicamente un tipo de transporte, en el cual debe ser igual el acceso en todas las direcciones.

En la siguiente figura (1.6) se esquematiza la relación entre umbral y alcance en la teoría de Christaller.

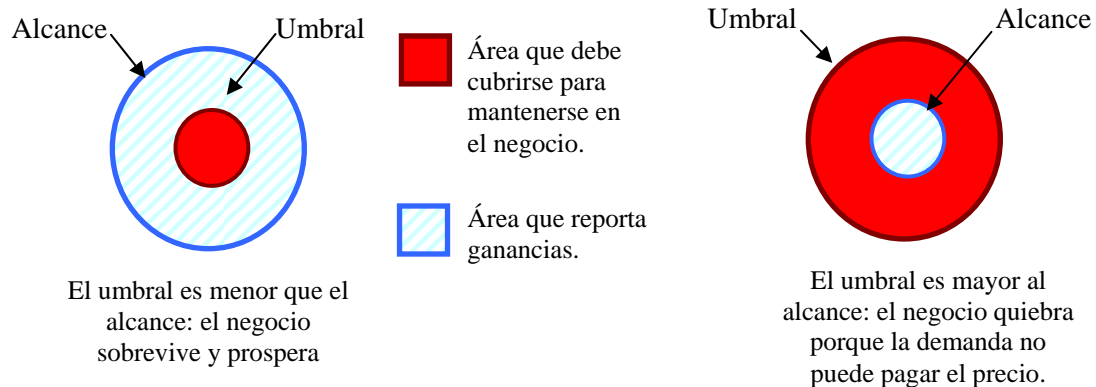


Fig. 1.6 Relación entre alcance y umbral.
Fuente: Garrocho, Chávez y Álvarez, 2003.

La teoría de Christaller sugiere que existen reglas para determinar el tamaño, número y distribución de las ciudades. A partir de esto, Christaller dedujo “el resultado de las preferencias de los consumidores es un sistema de centros de tamaño variable que emergen sobre el espacio. Cada centro proveerá de tipos particulares de bienes conformando distintos niveles de jerarquías. En las jerarquías funcionales, las generalizaciones se pueden hacer con respecto al espaciamiento, el tamaño y a la función de establecimientos: cuanto más grandes sean en tamaño los centros, menor será su número y mayor la distancia entre ellos y conforme un centro aumenta de tamaño, la especialización, y variedad de sus funciones aumentarán”.

Esta teoría es la evolución lógica del espacio producido por los sistemas centro-periféricos, pues llega a suceder que algunos de los lugares seleccionados como centros adquieren un valor social, simbólico o económico hacia los cuales convergen flujos (de personas, de energía, de materiales o de información) que van de la periferia hacia el centro y que los diferencia de otros centros. Al fenómeno de convergencia se le llama polarización. La propiedad que tienen los centros de ofrecer a su periferia un cierto número de servicios se denomina *centralidad*. El funcionamiento de la centralidad supone que el centro mantiene en el transcurso del tiempo una buena accesibilidad para su periferia. Lo más común es que el centro ejerza también bajo diversas formas cierta preponderancia -que puede ser política, militar, religiosa, comercial o administrativa- sobre su periferia, lo cual se traduce en un intercambio desigual, una disimetría en el balance de *interacciones* entre centro y periferia, a favor del centro. Este proceso tiende a reforzar la acumulación de la oferta en el centro, lo que aumenta el grado de complejidad de sus actividades.

La dimensión de la periferia *polarizada* por un centro depende del alcance de las actividades del centro, ligado a su nivel de complejidad, y de las modalidades de circulación entre la periferia y el centro, que históricamente acrecientan la velocidad de los desplazamientos y en consecuencia los alcances (también llamados áreas de influencia) de los centros.

En este contexto, Christaller dedujo que los compradores acudirán a la unidad comercial más cercana y los vendedores se localizarán lo más cerca posible de los consumidores. Este comportamiento espacial generará una distribución territorial de puntos de oferta que maximizará -en términos agregados- tanto la accesibilidad de los consumidores como los beneficios de los empresarios. El resultado es un patrón espacial de áreas de mercado circulares que cubre todo el territorio y que, al traslaparse, adoptan una forma hexagonal y una jerarquía de puntos de oferta definida por la centralidad de cada uno de ellos (figura 1.7). Las diferencias de centralidad se explican en función de las ventajas estratégicas de ciertas localizaciones que permiten cubrir una mayor proporción del mercado.

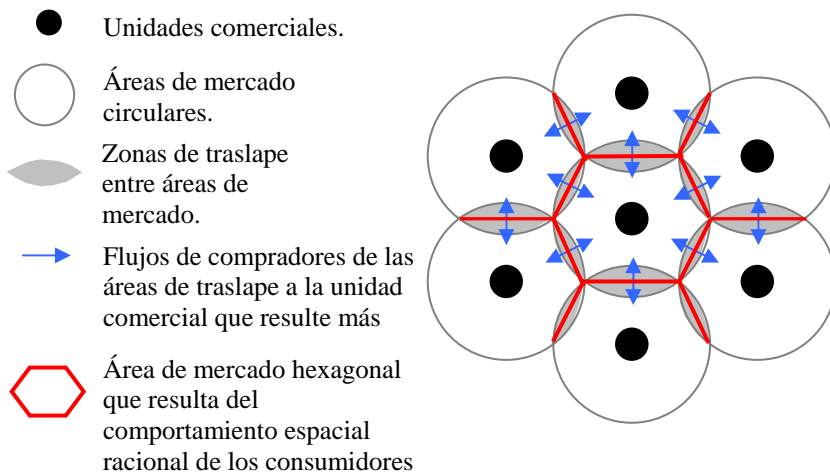


Fig. 1.7 Conformación de áreas de mercado hexagonales según la lógica de la teoría de lugares centrales de Christaller.

Fuente: Garrocho, Chávez y Álvarez, 2003.

Las interacciones entre los centros y sus periferias, permiten definir las periferias como una red de lugares accesibles en conexión. Ciertamente las distancias-tiempo y/o las distancias-costo son las que tienden a regular estas interacciones.

Los centros emergen a una *distancia* característica de otro centro, llamada *espaciamiento*. La regularidad del espaciamiento se refiere a la población o a las actividades que los centros presentan (y no a la distancia física). El espaciamiento medio entre los centros aumenta con el nivel de complejidad del sistema. De ello se desprende una organización jerárquica de la trama espacial de los centros. La diferenciación del espacio en centros y periferias puede encontrarse en diferentes escalas. Esta organización multiescalar característica del ejercicio de la centralidad y la polarización incita a explorar el carácter fractal³ de los procesos evolutivos que engendran las configuraciones jerarquizadas de los lugares centrales y sus periferias.

³ Fractal: Término propuesto por Mandelbrot (1975). En matemáticas, una fractal es un objeto geométrico tal que las mismas propiedades aparecen en distintas escalas. Hay entonces una estructura jerarquizada, que sigue una ley hiperbólica bien definida, ya sea determinista (fractal regular), ya sea estocástica (fractal aleatoria). La dimensión fractal se utiliza para comprobar la existencia de una organización jerárquica en diversos sistemas (morfología urbana, repartición de la población, lugares centrales, redes de transporte, etc.).

Posteriormente Lösch (1954) discute y enriquece la teoría de Christaller, al incorporar las ciudades de paso y señalar que deben considerarse por la transportación al momento de diseñar rutas. Compara además diversos escenarios económicos y discute el efecto de las regiones frontera. Después Isard (1956) modificó el modelo introduciendo una red de comunicación diferenciada basada en la tendencia de la industria y de la población a formar aglomeraciones. En este modelo las áreas de mercado aumentan a medida que se alejan de la ciudad principal y de las vías de comunicación principales. En la siguiente figura (1.8) se muestra un ejemplo de la estructura de este modelo.

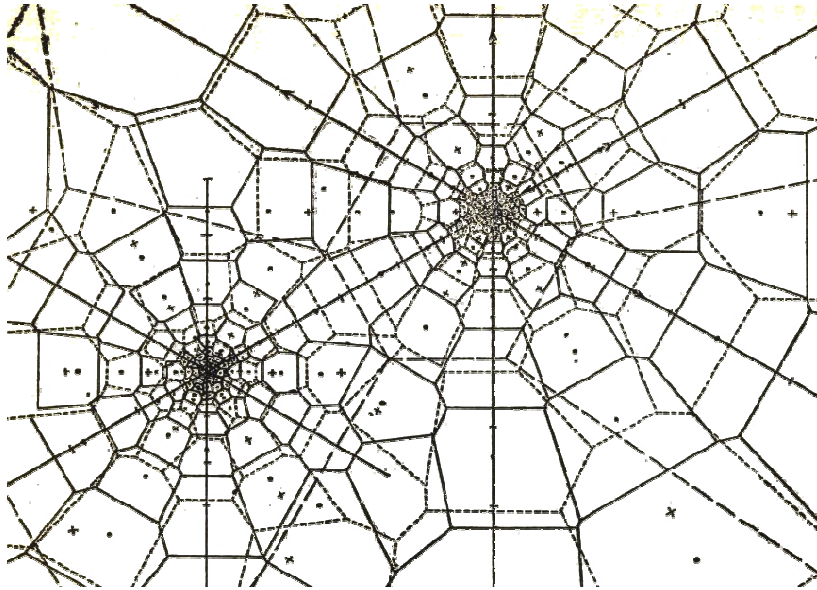


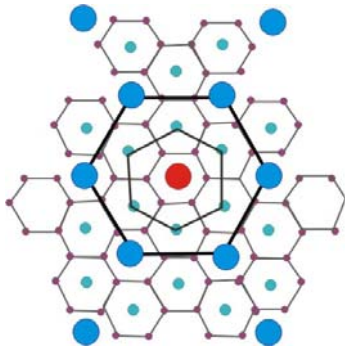
Figura 1.8 El sistema de lugares centrales de Lösch contemplando la distribución de la población según Isard.

Fuente: Potrykowski, 1982.

La validez de la teoría de lugares centrales varía según los factores locales del sistema en estudio como: el clima, relieve, historia, desarrollo tecnológico y preferencias de los consumidores y proveedores. El nivel económico de los consumidores en un área es también importante. Los consumidores con un nivel económico alto tienden a tener mayor movilidad y accesibilidad a otros centros. El uso de la teoría de lugares centrales debe ser calibrado por un conocimiento de tales factores al proponer esquemas de desarrollo para un espacio. El poder de compra y la densidad afectan el espaciamiento entre los centros así como su jerarquía. Una mayor densidad por ejemplo, puede generar para una tienda una jerarquía menor, o viceversa si fuera la única en su tipo. Algunos de los factores que dan forma a la extensión de las áreas de mercado son: uso de suelo, accesibilidad, competencia y tecnología.

Los estudios de las áreas del mercado proporcionan otra técnica para usar la teoría de lugares centrales como herramienta para la planeación de la localización de sitios. La jerarquía de los centros de compras se ha utilizado extensamente en la planeación de nuevas ciudades, ya que en ellas la jerarquía de los centros de negocio es evidente. Un centro de compras principal proporciona sobre todo las mercancías durables (de jerarquía más alta) mientras que los centros de compras locales proporcionarán productos perecederos y de uso común (con una jerarquía más baja), además estos centros no están libres de la competencia con el exterior, por ellos los impactos con los centros existentes que rodean no pueden ser ignorados.

Teoría de difusión espacial



La difusión es el resultado de la *polarización* existente en un sistema en función de las *oportunidades* de propagación. Provoca pasar de un estado de equilibrio a otro cuando, bajo condiciones dadas, el sistema se satura, agotadas sus capacidades de absorción. La noción de difusión espacial comprende el conjunto de procesos que contribuyen a las interacciones espaciales, como pueden ser los fenómenos migratorios y los efectos de retorno que estos desplazamientos generan en el espacio, la relocalización o los movimientos de expansión. La difusión

sucede cuando los centros desarrollan un estado de *competencia* para la captación de los recursos de su periferia, y desarrollan innovaciones en el transcurso de su proceso interactivo. El desarrollo de las innovaciones depende de la acción de los actores localizados en el centro y puede consistir en una creación, anticipo y tentativa de explotar un beneficio, o bien en una imitación de una innovación ya lograda en otra parte; ambas actitudes constituyen una estrategia de adaptación. Las innovaciones impuestas o imitadas de este modo se difunden entre los centros, por proximidad o por difusión jerárquica.

Un centro sólo adquiere un nivel de centralidad superior por acumulación o por aumento de la complejidad de sus actividades si logra competir con otros centros captando la ventaja inicial de un número suficiente de innovaciones. Este proceso tiende a regular el espaciamiento de los centros en todos los lugares donde las interacciones se producen en contigüidad durante un tiempo bastante largo según su proximidad, y también conduce a una desigualdad creciente en el peso de los centros. Esto se refuerza con el juego de la expansión sistemática del alcance de las interacciones espaciales debido al crecimiento de la velocidad de las comunicaciones, lo que determina una tendencia histórica a la contracción del espacio físico y a la extensión del espacio accesible a las interacciones.

T. Hägerstrand (1953) introduce la vía para modelar la difusión. Las condiciones necesarias para que se produzca la difusión de una innovación han sido identificadas como:

- Aparición de una innovación apta para las interacciones, y que pueda imponerse como tal.
- Capacidad de la innovación para volverse foco emisor,
- Existencia de un medio de recepción que favorezca una propagación rápida y
- Fuerza de propagación suficientemente grande y tiempo de propagación suficientemente largo como para que la interrupción del proceso de difusión sea poco probable.

Una vez que se presentan estas condiciones, el proceso de difusión consta de las siguientes etapas:

1. Comienzo. La difusión introduce una diferenciación nueva en el espacio geográfico, se dibuja un contraste entre los lugares que han adoptado la innovación y los demás.
2. Expansión. Es el período de desarrollo del proceso, que se traduce en una reducción progresiva de los contrastes más fuertes entre los lugares.
3. Condensación. La tasa de penetración en los diferentes lugares tiene a homogeneizarse, no obstante que, de un lugar a otro, se acortan las velocidades de difusión.
4. Saturación. La tasa de penetración de la innovación crece de manera asintótica hacia un *maximum*.

Una función logística que describe el crecimiento de una población en un espacio con recursos limitados es comúnmente utilizada para modelar el desarrollo del proceso en el tiempo. En este caso, el número de los adoptantes potenciales representa el recurso que limita la expansión de la difusión. Las cuatro grandes etapas del proceso de difusión pueden ser localizadas sobre la curva que representa a esta función. La siguiente figura (1.9) muestra la curva logística del comportamiento de la difusión. Puede distinguirse el máximo en la proporción acumulada de los adoptantes al llegar al nivel de saturación.

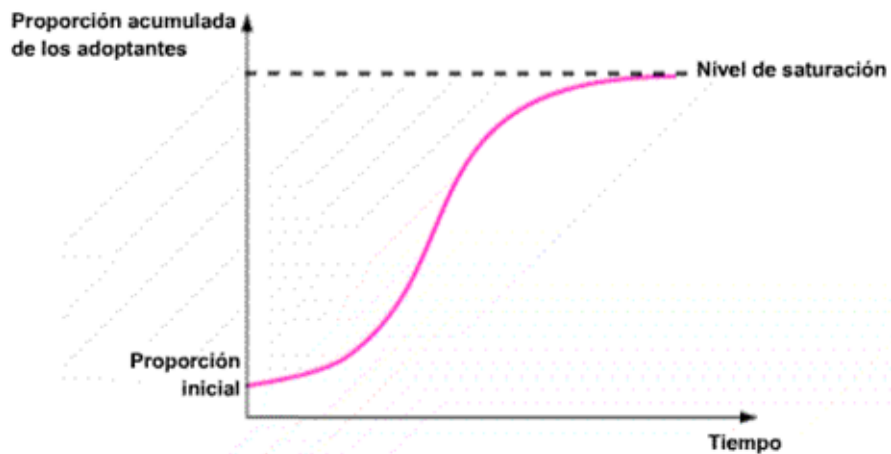


Figura 1.9. Curva logística del proceso de difusión.

Fuente: <http://hypergeo.free.fr/>

Antes de la existencia de las tecnologías modernas de comunicación, la difusión espacial de las innovaciones procedía ampliamente por contagio gracias a la vecindad y el comportamiento de las probabilidades de contacto entre emisores y receptores de la innovación disminuían rápidamente con la distancia. La instantaneidad de la propagación, posibilitada por las nuevas técnicas de difusión de la información, da crédito a veces a la idea de que los desfases espacio-temporales de la difusión habrían perdido toda significación. Si, para un gran número de innovaciones, estas nuevas técnicas han reducido las fricciones del tiempo y de la distancia en la transmisión de la información, las estructuras del espacio geográfico de recepción mantienen diferenciaciones importantes en

los tiempos de respuesta, que transforman una información recibida en una innovación adoptada.

Varios paradigmas han cambiado conforme crece la posibilidad de difundir y transportar grandes volúmenes de información, de manera casi instantánea en espacios virtuales mediante redes informáticas sin importar la distancia física, además los tiempos de desplazamiento disminuyen significativamente, como es el caso de la transportación física en modos aéreos y terrestres. Por citar algunos ejemplos, en el proceso de difusión de enfermedades, tecnología y cultura, la distancia ya no es un factor de impedancia con las mismas características que las consideradas hace veinte años.

El surgimiento de tecnologías para el empaque, la conservación y los nuevos manejos en la logística de productos perecederos también ha cambiado los efectos de fricción por separación espacial. Antes de la concepción de la cadena de frío y de la utilización de conservadores era mucho más costoso (en ocasiones prácticamente imposible) transportar de un continente a otro ciertos productos, cuestión que en nuestros tiempos se puede superar en múltiples casos.

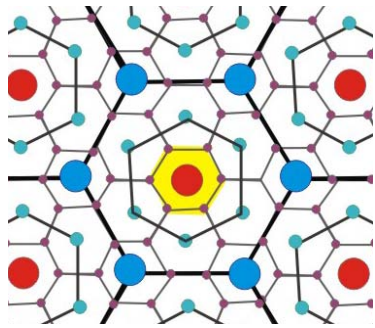
También la difusión es sensible a la estructura jerárquica de los sistemas: el fenómeno tiene tendencia a aparecer siguiendo el sentido descendente de la jerarquía. Por las mismas razones, mientras más grande es el centro emisor, más elevada es su fuerza de impulsión en el proceso de difusión, de allí el sentido descendente de la difusión de un gran número de innovaciones en las redes urbanas. A la inversa, los procesos de difusión espacial son frenados, desviados, a veces detenidos por las *barreras* espaciales de naturaleza social, económica o ambiental.

La modelación del proceso de difusión utiliza los principios base de los modelos de interacción espacial (efecto de las masas y de la distancia, efectos barrera, etc.), a los cuales se da frecuentemente la forma de una función exponencial negativa de la distancia. Al discretizar el tiempo del proceso, para cada unidad de tiempo, las reglas de interacción espacial introducidas en el modelo permiten definir en todo lugar las probabilidades de contacto entre emisor y receptor, y en consecuencia las probabilidades de propagación local en un campo de contacto expresado en una malla de probabilidades por ejemplo. T. Hägerstrand (1953) propuso el recurrir al método Monte Carlo⁴ para simular la propagación espacial en el transcurso del tiempo como un proceso aleatorio. Actualmente los métodos informáticos de modelización parecen ampliar bastante el campo de las posibilidades para la previsión geográfica de una difusión.

Finalmente, un mismo proceso de difusión espacial es casi siempre multiescalar, y en este caso el juego de las interacciones que guía la difusión se modifica de una escala a otra. Estas observaciones son importantes, porque permiten afirmar que desechar teorías elaboradas antes del advenimiento de estas tecnologías no es correcto, al contrario, es conveniente adaptar y enriquecer aquellas que siguen vigentes por su universalidad.

⁴ El método Monte Carlo es una clase de algoritmos utilizados para simular el comportamiento de sistemas matemáticos y físicos. Se distinguen de otros métodos por ser estocásticos y usualmente utilizan números aleatorios. Bernd, 2004.

Teoría de localización



La teoría de localización consiste en elegir la ubicación de un objeto en un lugar, teniendo en cuenta las ventajas relativas que la posición de ese lugar representa. Siempre debe responder a la pregunta ¿dónde?, como por ejemplo, ¿dónde habitar?, ¿dónde implantar la producción de un bien o de un servicio? o ¿dónde ubicar un equipamiento colectivo? Todas las respuestas deben considerar los objetivos con las que fueron propuestas, y la localización resultante debe ser siempre la más ventajosa.

Concretamente, la elección de la localización de un lugar supone la movilización de una gran variedad de factores entre los cuales algunos tienen una dimensión espacial explícita. Considerando los ejemplos anteriores, para las empresas se tendrán particularmente en cuenta la localización y los costos de transporte de los recursos (materiales e inmateriales) necesarios para la producción, la localización de los competidores, o incluso por ejemplo la localización de los mercados y los costos de transporte generados por el envío de esos bienes o servicios a esos mercados. Para la localización residencial óptima, se considerarán particularmente, por ejemplo, las localizaciones del trabajo, los costos de los terrenos y los costos de desplazamiento entre el lugar de residencia y el lugar de trabajo. Los numerosos casos de estudio realizados por múltiples investigadores, permiten afirmar que los parámetros que parecen intervenir sistemáticamente en estas preferencias espaciales son a la vez pocos y relativamente estables.

Se ha desarrollado toda una línea de investigación en torno al problema de la modelación de la localización óptima de una empresa, a partir de los trabajos pioneros de Weber (1909), sobre la localización óptima, y de Hotelling (1929), sobre la interacción de las localizaciones. Los desarrollos realizados posteriormente sobre estas cuestiones de localización fueron más en el sentido de un enriquecimiento de la aproximación económica y de los métodos de formalización, que en el de una renovación de las modalidades que toman en cuenta el espacio. Hablando en términos generales, en la teoría clásica de localización se adoptan dos grupos de planteamientos (Lloyd, Dicken, 1977). El primero se refiere al carácter de la superficie, que representa un plano homogéneo e ilimitado en el espacio, lo cual significa que:

1. Este plano es idealmente llano y no presenta obstáculos al movimiento que puede desarrollarse en todas las direcciones,
2. Los costes de transporte son proporcionales a la distancia del transporte; y existe un solo sistema de transporte, libre de toda diferenciación interna, y
3. Los recursos se distribuyen de una forma homogénea, es decir, el suelo tiene en todas partes una misma fertilidad, las materias primas minerales se encuentran en todas partes, etc.

El segundo grupo de planteamientos se refiere sobre los individuos que habitan la zona en estudio. Esta población se caracteriza por:

1. Una distribución igual en el espacio,

2. Idénticos ingresos, estructuras de la demanda y tendencias del consumo,
3. Un comportamiento racional, es decir, de conformidad con el principio de la administración económica. Los productores actúan con la misma racionalidad que los consumidores.

Diferentes teorías de localización, acentúan algunas de las premisas citadas, o bien omiten algunas e incluyen otras nuevas. Ejemplo de ello son la teoría de renta de localización de Thünen (1826), y el factor de costes de transporte de Weber (1909). A continuación se expone brevemente la teoría de localización de este último autor.

Localización del punto de costes mínimos de transporte (Weber, 1909)

Para su teoría Weber supone un espacio isotrópico, pero, con recursos localizados en un punto y con un mercado en otro punto. En general su teoría se aplica a la industria pesada, aunque, con ciertas modificaciones también puede aplicarse a la industria ligera. El factor fundamental del que trata la teoría es la distancia de la planta de producción a los recursos y al mercado. Lo que se localiza es la planta de producción, que es el lugar de fabricación. También considera que los costes de producción son los mismos en todas partes. Con estos supuestos, lo ideal es que la planta se ubique en el lugar donde los costes de transporte estén minimizados. Weber representa su teoría en un triángulo, en el cual, dos vértices corresponden a los productos que necesita en su elaboración y otro vértice es el lugar de mercado aunque lo normal es que en la elaboración de cualquier bien se necesite más de un producto, incluso los productos elaborados por otras empresas. Weber distingue entre: materiales puros que se venden tal y como se encuentran en la naturaleza, como los tomates; y los materiales brutos, que han sufrido algún tipo de elaboración y han perdido peso, como la madera para muebles.

Según Weber la ubicación de una planta industrial está relacionada con cuatro factores fundamentales: la distancia a los recursos naturales, la distancia al mercado, los costes de la mano de obra y las economías de aglomeración. Estos dos últimos factores están modificados por decisiones políticas. Weber no considera en su teoría las fuentes de energía, aunque pueden incluirse como materia prima, ya que es posible considerarlas como un coste más de producción, y tiene características muy similares a las materias primas.

En la teoría se consideran dos tipos de materiales de producción: los *ubicuos*, como el agua, la arena o cualquiera que pueda encontrarse en múltiples lugares; y los *recursos localizados*, que sólo se encuentran en un determinado punto y son esenciales para la elaboración de ciertos productos. Estos últimos son los que tendrán más peso en la localización de la planta, aunque existen regiones en las que, lo que Weber considera materiales ubicuos, no lo son tanto. En el primer supuesto Weber considera que los costes de producción son iguales en todas partes, por lo que sólo es posible una variación del precio unitario debido a los costes de transporte. La ubicación de la planta será allí donde los precios de transporte sean mínimos. Estos precios están en función de la pérdida de peso en el proceso de elaboración, de la fragilidad o del aumento del valor añadido.

Weber elabora un índice de materiales, en el que se divide el peso de los recursos utilizados entre el peso del producto elaborado. El resultado indicará la dependencia de la planta para localizarse cerca de los recursos o cerca de los mercados. En los materiales

puros el resultado es 1, en los materiales brutos serán mayor que 1; cuanto más alto sea el índice material más dependencia tendrá la planta de la localización de los recursos, ya que el producto elaborado pierde más peso, y por lo tanto cuesta más transportar la materia prima que el producto elaborado; cuanto más bajo sea el índice material más cerca del mercado se situará la planta. Weber consideraba como peso de ubicación al índice de materiales más uno ($PU=IM+1$). En este modelo no se tienen en cuenta ni la energía empleada ni el valor añadido del producto.

En el segundo modelo Weber introduce cambios en función del coste de la mano de obra y de las economías de aglomeración. Estos factores pueden hacer que el coste de producción descienda en algún otro punto; y la planta tendería a instalarse allí donde producir le saliera más barato, siempre y cuando el ahorro en los costes de producción superen el aumento de los costes de transporte; a los que se ha de hacer frente, ya que la nueva localización no es el óptimo de reducción de los costes de transporte. El triángulo que Weber utilizó en el primer modelo aparece ahora rodeado de círculos concéntricos que representan el coste del transporte en un área, cada círculo se llama *isodapana*. Si se sitúa un punto en el que los costes de la mano de obra son menores que los costes del transporte, dentro de la isodapana, la planta se ubicará en ese punto, pero si los costes de la mano de obra quedan fuera de la isodapana la planta no se trasladará. El límite entre los costes de transporte y el ahorro en la fuerza de trabajo es la isodapana crítica.

Este método fue aplicado en un principio a la optimización de costos de transportación en las industrias, donde cada combinación de transportes incluye dos elementos: el transporte de materias primas al lugar de producción (C1) y la expedición de los productos finales desde la fábrica al mercado (C2). Como se esquematiza a continuación en la figura 1.10.

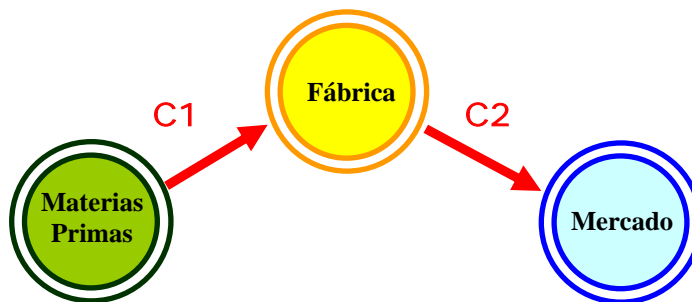
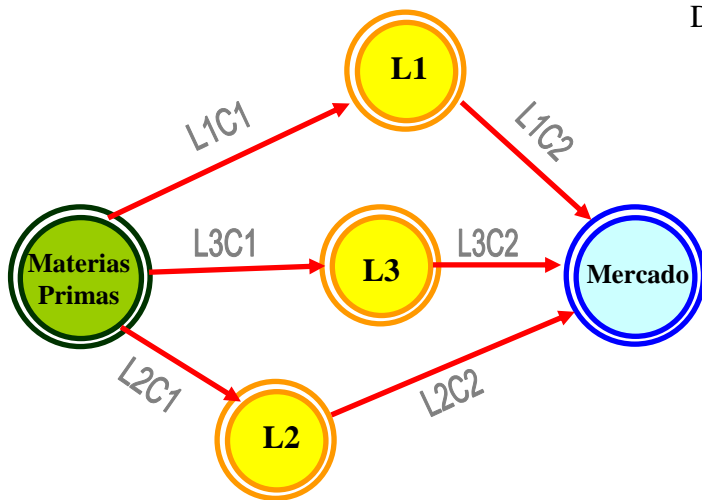


Figura 1.10
Conceptualización de
la producción
industrial clásica.

Fuente: Potrykowski,
1982

El método de las isodapanas permite obtener diversos costos totales de transportación ($C1+C2$) para ubicaciones *supuestas* de la fábrica. Así es posible elegir la que implique el menor costo. Los costos totales se pueden entender mejor observando la figura 1.11.



Donde:

- L Localidad (1,2 o 3) donde es posible ubicar la fábrica,
- C1 Costo de transportar las materias primas a la fábrica.
- C2 Costo de transportar el producto terminado desde la fábrica al mercado

Figura 1.11 Conceptualización de los costos totales de transporte para diferentes localizaciones de una fábrica. Fuente: Potrykowski, 1982

Ubicación	Costo Total
L1	$L1C1+L1C2$
L2	$L2C1+L2C2$
L3	$L3C1+L3C2$

En un área homogénea son trazadas isolíneas⁵, haciéndolo por separado para el lugar de producción de las materias primas (A) y para el mercado (B). Si las tasas de transporte son proporcionales a la distancia, las isolíneas adoptan formas de círculos concéntricos en torno a los lugares dados como se muestra en la figura 1.12.

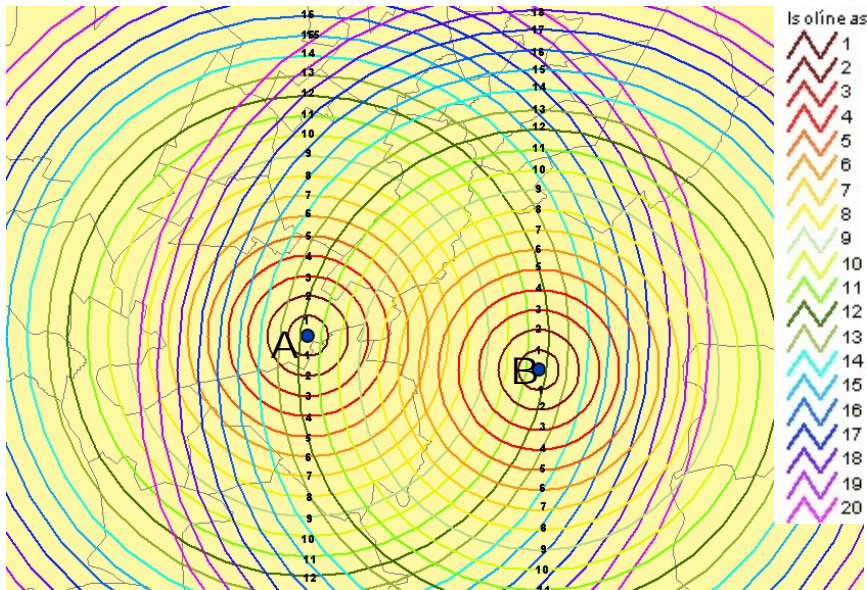


Figura 1.12 Isolíneas a cada kilómetro sobre una área homogénea a partir de los puntos A y B.

Fuente: Elaboración del autor.

Evidentemente, si las tasas de transporte no son proporcionales a la distancia, como sería la existencia de vías de comunicación especialmente baratas o con menor tiempo de recorrido la distribución de las isolíneas es de la forma mostrada en la figura 1.13.

⁵ Las isolíneas son líneas que unen puntos con igual valor.

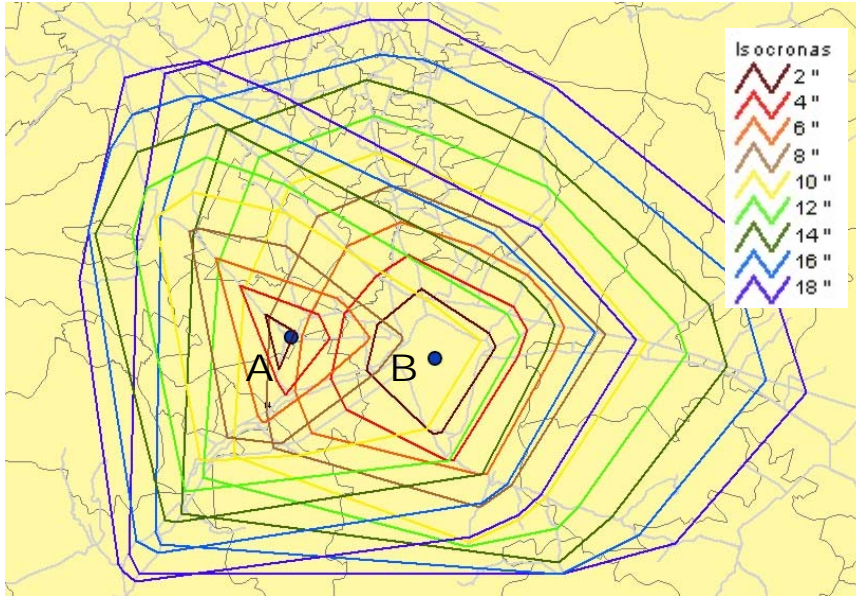


Figura 1.13
Isolíneas que consideran el tiempo de recorrido sobre la red vial desde los puntos A y B.

Fuente:
elaboración propia.

En la siguiente figura (1.14), se han trazado algunas isodapanas (en líneas de color) que unen todos aquellos puntos donde el *costo total* del transporte de materias primas y de productos finales *es el mismo*. El sitio deseado para localizar la empresa será aquel con los costes mínimos de transporte, que por consiguiente está marcado por la isodapana de menor valor (12 kilómetros en este caso).

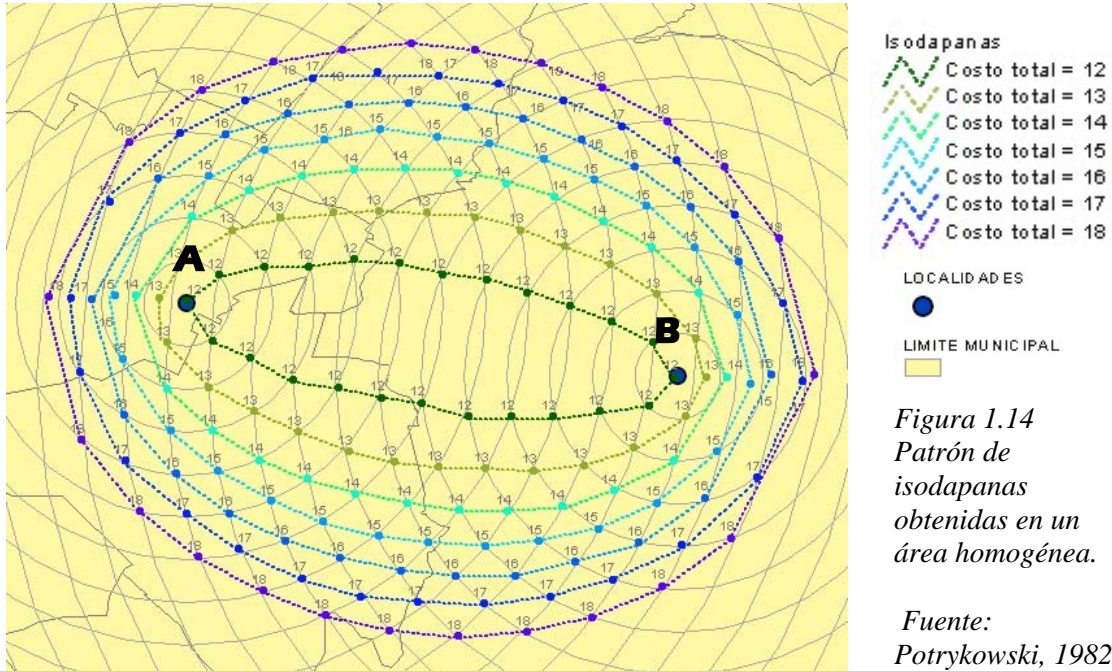


Figura 1.14
Patrón de isodapanas obtenidas en un área homogénea.

Fuente:
Potrykowski, 1982

La ventaja que el método de isodapanas ofrece es que puede aplicarse con cualquier número de vías y tasas de transporte (Lösch, 1961). Incluso considerando espacios heterogéneos social y económicamente hablando y con disponibilidad de infraestructuras y servicios diferenciados, si se tiene dicha información su manejo en los Sistemas de

Información Geográfica facilitan su tratamiento lo que permite tener visión territorial para la decisión de las oportunidades de localización.

Ejemplo de aplicación No.1.

Isodapanas utilizando costo sobre la red

Un ejemplo práctico en transporte utilizando la modelación de las isodapanas es el siguiente: Suponga que se quiere localizar un sitio que minimice el costo de transportación de productos de una industria que se abastece de materias primas que son producidas en la ciudad de Cholula, y que comercializa el producto terminado en la capital del estado, H. Puebla de Zaragoza. A simple vista y por practicidad, la mejor localización sería Cholula, pero utilizando la teoría de localización, se pueden obtener resultados más precisos y de mayor interés.

Lo primero consiste en obtener los *tiempos de desplazamiento sobre la red* carretera para cada una de las localidades. Este análisis con la ayuda de la tecnología de un Sistema de Información Geográfica es posible. Al ilustrar en un mapa estos tiempos, se obtienen áreas con intervalos iguales de tiempo de desplazamiento, llamadas *isocronas*⁶. Dos formas para representar las isocronas en un mapa utilizando tecnología de un SIG son:

1. Isocronas vectoriales.- Mediante un análisis de *áreas de servicio* son obtenidos diversos polígonos cuyos vértices son los límites obtenidos por los tiempos de desplazamiento sobre la red (figura 1.15).

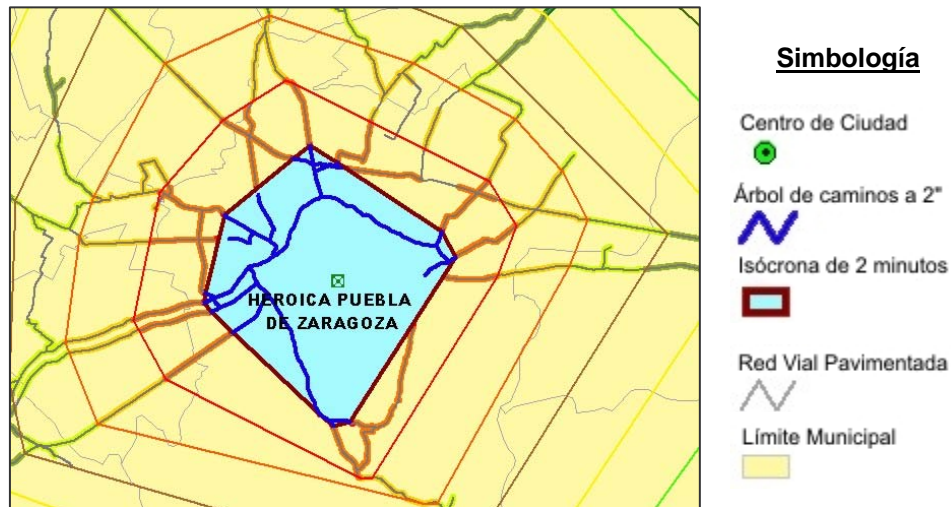


Figura 1.15 Isocronas y área de servicio vectorial de 2 minutos a partir del centro de la ciudad de Puebla. Fuente: elaboración propia.

⁶ Las isocronas son obtenidas aplicando un modelo de rutas óptimas, que considera la velocidad de desplazamiento sobre los diversos tramos de la infraestructura carretera para optimizar el tiempo de recorrido.

2. Isocronas raster.- Consiste en interpolar los valores de desplazamiento para cada punto de la red para obtener una mapa con formato de malla. Aquí cada píxel tiene asignado un tiempo (Figura 1.16).

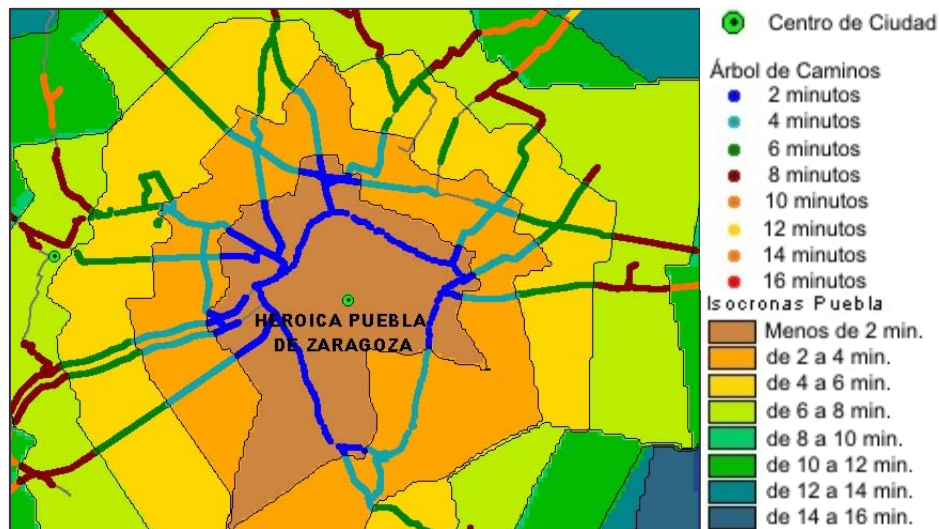


Figura 1.16 Isocronas raster hechas mediante un proceso de interpolación.
Fuente: elaboración propia.

El tipo de representación (raster o vector) dependerá del tipo de análisis que se quiera realizar, ya que entre ambos formatos la exactitud y calidad-cantidad de la información base empleados para la elaboración del modelo de isocronas varía.

A continuación se muestran ambos tipos de isocronas para el problema de ejemplo (Figuras 1.17, 1.18 y 1.19). Puede observarse la diferencia en los resultados obtenidos mediante la aplicación de ambos procedimientos.

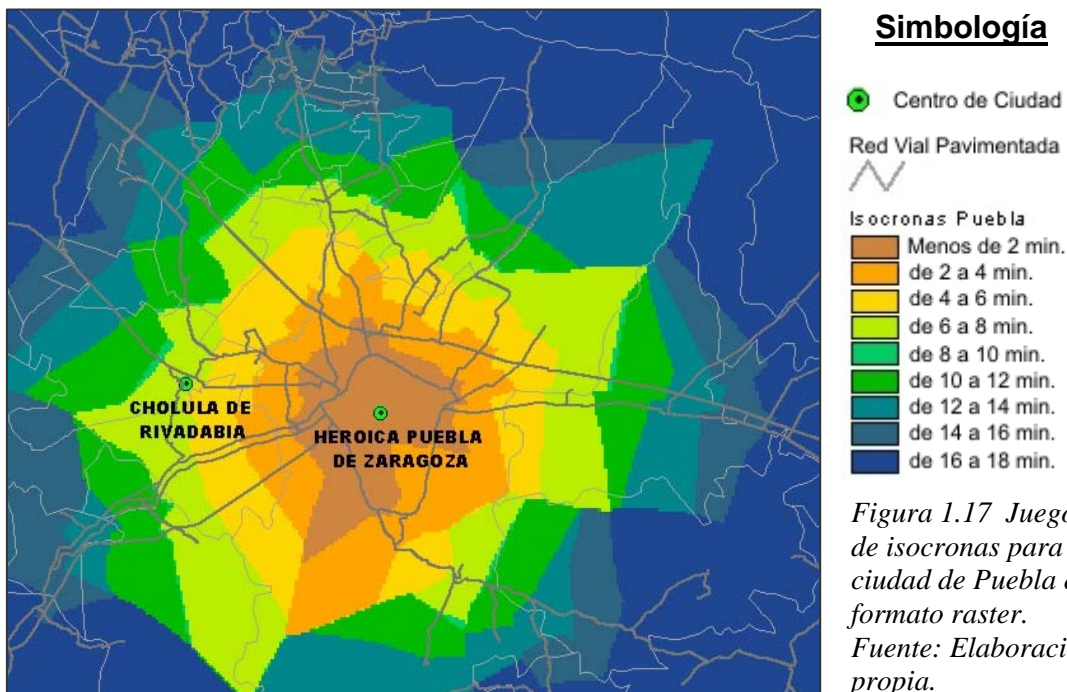


Figura 1.17 Juego de isocronas para la ciudad de Puebla en formato raster.
Fuente: Elaboración propia.

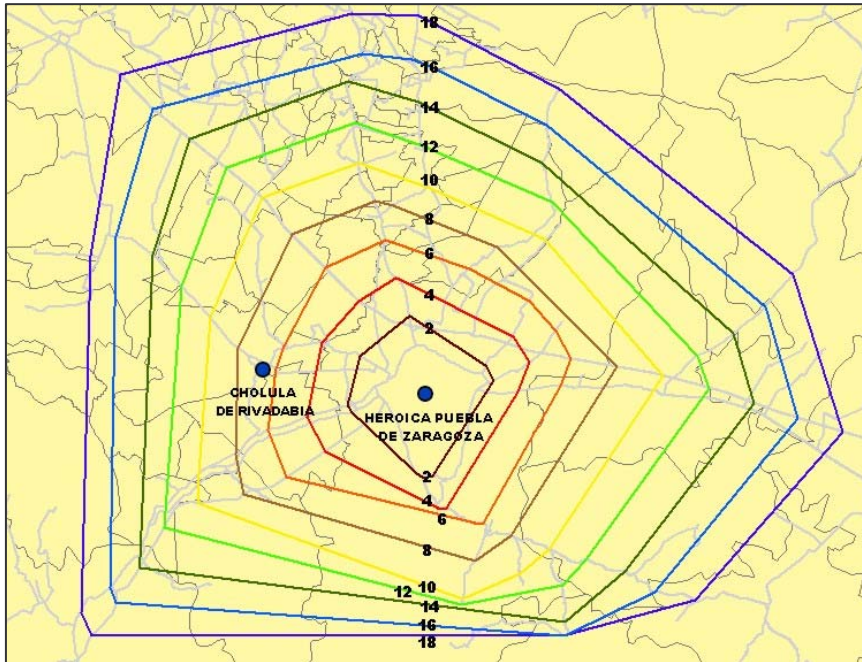


Figura 1.18 Juego de isocronas para la ciudad de Puebla en formato vectorial.

Fuente: elaboración propia.

Simbología

- Centro de ciudad
- Contornos de Isócronas
 - Menos de 2 min.
 - de 2 a 4 min.
 - de 4 a 6 min.
 - de 6 a 8 min.
 - de 8 a 10 min.
 - de 10 a 12 min.
 - de 12 a 14 min.
 - de 14 a 16 min.
 - de 16 a 18 min.

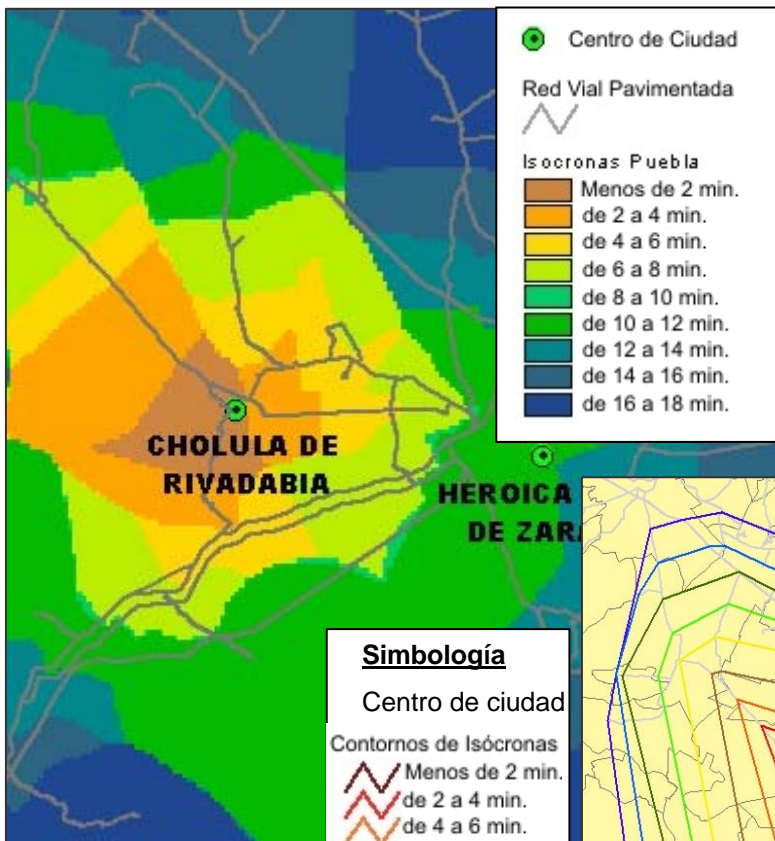
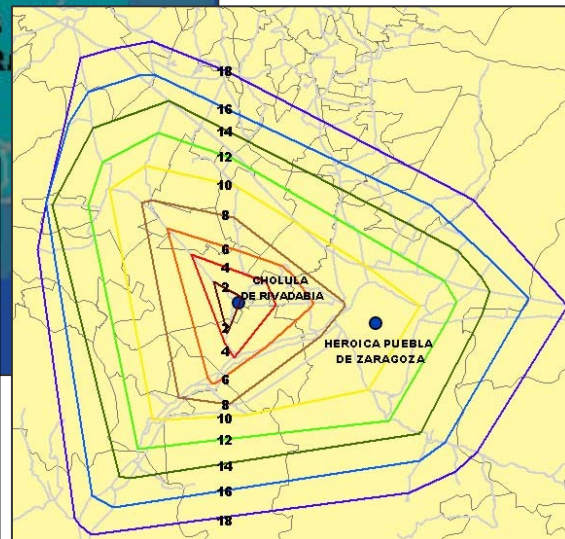


Figura 1.19 Juego de isocronas para la ciudad de Cholula. Del lado izquierdo se tienen en formato raster y del derecho en vectorial.

Fuente: elaboración propia.

- Simbología**
- Centro de ciudad
 - Contornos de Isócronas
 - Menos de 2 min.
 - de 2 a 4 min.
 - de 4 a 6 min.
 - de 6 a 8 min.
 - de 8 a 10 min.
 - de 10 a 12 min.
 - de 12 a 14 min.
 - de 14 a 16 min.
 - de 16 a 18 min.



Una vez obtenidas las isocronas, el siguiente paso consiste en localizar los lugares en los que se realicen iguales costos totales de transportación (isodapanas).

Si se utilizan las isocronas obtenidas por interpolación, el proceso es utilizar el álgebra de mapas. Por ejemplo, si se desean obtener las áreas donde el costo total de transportación sea del intervalo de 10 a 12 minutos, la operación es:

$$\{[(\text{Isocronas A}) + (\text{isocronas B})] \geq 10\} \text{ y } \{[(\text{isocronas A}) + (\text{isocronas B})] < 12\}$$

Al obtener consecutivamente diversos valores de isodapanas, es posible construir un mapa como el siguiente (Figura 1.20):

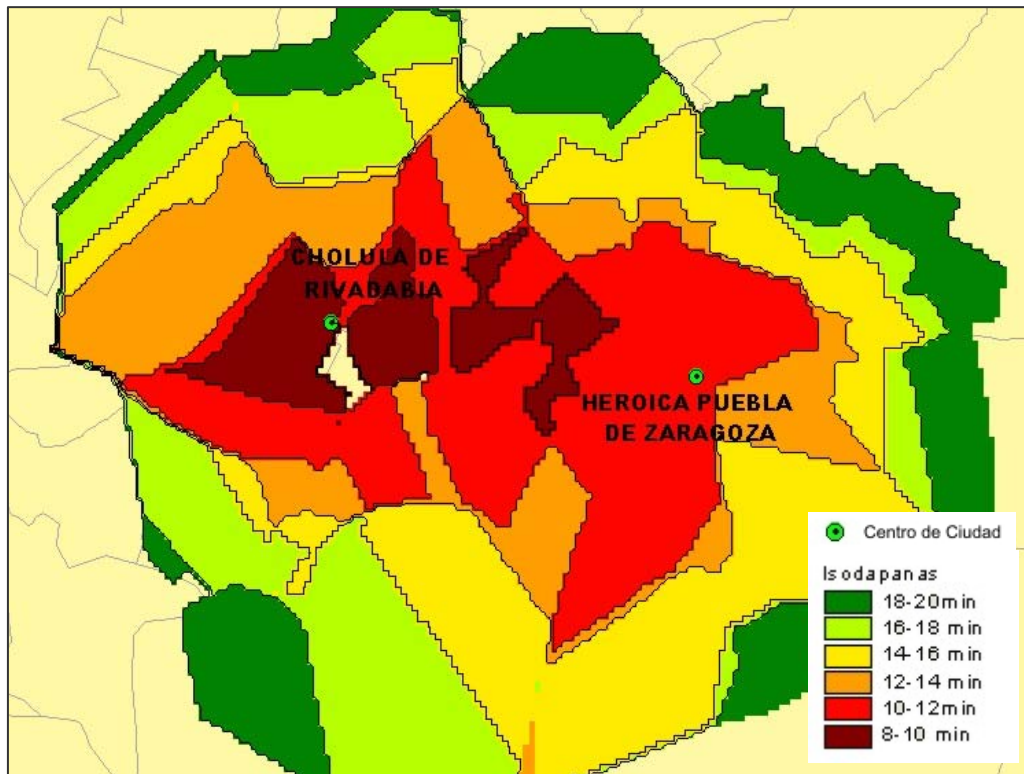


Figura 1.20 Mapa de isodapanas para el problema de ejemplo.
Fuente: elaboración propia.

En el mapa anterior son identificables los lugares con coste mínimo de transporte (en este análisis es el intervalo de 8 a 10 minutos en total, representado con el color rojo oscuro). Esto significa que el lugar idóneo de localización que minimiza el costo es en esta región.

Al momento de realizar un análisis de localización con este tipo de modelos, también se deberá tener en consideración otros factores de importancia significativa como la *estructura de la cadena de suministros de la empresa a localizar* y los *tiempos de retorno del transporte*. Además destacan cuatro posibles niveles de análisis: 1) El pequeño productor individual, 2) El productor mediano o grande, 3) El grupo de productores o toda la rama industrial y 4) La economía de la región, del país o a nivel global.

Weber también tuvo en cuenta el efecto de las economías de aglomeración. Por el hecho de estar situada en una región industrial, una planta puede beneficiarse de ahorros en cuestiones como el acceso a los mercados, a las vías de comunicación, a la mano de obra especializada, a los servicios comunes y a los proveedores. Sin embargo, estos ahorros pueden desencadenar una competencia por la tierra y dispararse el precio del suelo, anulando los posibles ahorros.

Como ocurre en todos los modelos la teoría es más simple que la realidad, sin embargo el modelo de Weber es muy útil para comprender muchos fenómenos de localización industrial. La crítica más grave que se le puede hacer a este modelo radica más en la disponibilidad de la información que en sus limitaciones. Es necesario tener en cuenta los costes de extracción de los recursos, las limitaciones y costes de almacenamiento; estos factores pueden hacer subir considerablemente el precio unitario del producto. También cuanto mayor sea el valor añadido a un producto menos depende del transporte para generar plusvalías y crear beneficios.

El ejemplo del método de las isodapanas es una muestra de un modelo espacial con fines de localización aplicando los Sistemas de Información Geográfica. A continuación se hace una breve reseña sobre estas herramientas y su aplicación actual a los transportes.

1.3 Los Sistemas de Información Geográfica, definición y utilidad para el análisis de sistemas de transporte.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG por sus siglas en español, o GIS en inglés) son instrumentos para realizar diversos análisis mediante la creación, manipulación y actualización de diversos modelos cartográficos. Los objetivos generales de cualquier SIG son contar con la representación gráfica de la ubicación espacial de un problema, ser un sistema de recolección de datos para tener la información organizada, actualizada e instantánea y la modelación compleja de las variables contenidas.

Definición, componentes y funciones de los SIG

Los SIG integran en un mismo concepto datos, equipo de cómputo, programas, intereses diversos (científicos, de gestión y comerciales), disciplinas diversas (matemáticas, ingeniería, cartografía, geografía, economía, geología, biología, informática, etc.), personal (ingenieros, geógrafos, programadores, administradores, etc.) y modelos (espaciales, físicos, económicos, etc.) que permitan realizar análisis de los diversos fenómenos que ocurren en el espacio geográfico. Esta tecnología se construye en esencia sobre un modelo del espacio geográfico que se materializa en un agregado de unidades de información lógico-formales que pueden almacenarse y tratarse en una computadora. La interpretación de la información utilizada en un proyecto de SIG es compleja, implica solidez sobre los conceptos teóricos introducidos al sistema. Para lograr un modelo representativo se requiere diálogo constante entre los diferentes profesionistas que intervienen en el desarrollo del SIG (figura 1.21).

El soporte de estos sistemas está constituido por los equipos y programas de cómputo. Hasta ahora, estos últimos son productos de alta especialización con curvas de aprendizaje

lentas que reflejan diferentes teorías sobre los cálculos espaciales procedentes de disciplinas científicas diversas. Utilizar una determinada herramienta SIG para resolver un problema involucra la aplicación de una teoría o hipótesis acerca de los datos que se manejan. Esto hace pensar si los SIG deben considerarse como una herramienta neutra o como una disciplina científica.

Es importante comentar que debido al éxito de estos sistemas, la tendencia mundial de esta industria es diseñar programas que sean accesibles a la mayor cantidad de usuarios simplificando su manejo y proporcionando datos a bajo costo, un vínculo interesante en este sentido es la integración de servicios SIG en internet.



Figura 1.21 Componentes de un SIG.
Fuente: Basado en publicaciones de ESRI.

Para interpretar los fenómenos espaciales debe comprenderse la naturaleza de los datos geográficos, en los que se distinguen tres componentes:

1. *Espacial*, describe la posición de los objetos geográficos respecto a un sistema de coordenadas conocido y las relaciones locales entre los objetos (relaciones topológicas).
2. *Temático*, hace referencia al tipo de atributos que definen un objeto geográfico (tipo de material, población, vegetación, elevación, etc.).
3. *Temporal*, confina la variabilidad del fenómeno en el tiempo, asignando un determinado espacio posicional y temático para un objeto en un determinado instante.



Una vez conocida la naturaleza de los datos espaciales, es necesario elegir una estructura para codificarlos. Para este fin, existen diversos tipos y formatos que pueden utilizarse en un SIG y cada uno representa diversos fines, los principales son:

Formato vectorial: Conformado por objetos arco-nodo que representan cada objeto geográfico en forma independiente y están definidos por pares de coordenadas, por ejemplo: datos levantados mediante sistemas de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) y los datos digitalizados.

Formato raster: Son matrices de datos conformados por píxeles de tamaño regular y centra su interés más en las propiedades del espacio que en la representación precisa de los elementos que lo conforman, por ejemplo: imágenes satelitales y modelos digitales de elevación.

Como se mencionó anteriormente, en todos los casos, la información espacial es desplegada en el SIG mediante un formato de capas, también conocidas como *layers* (figura 1.22). Cada objeto que se encuentra en estas capas tiene relación con una base de datos que

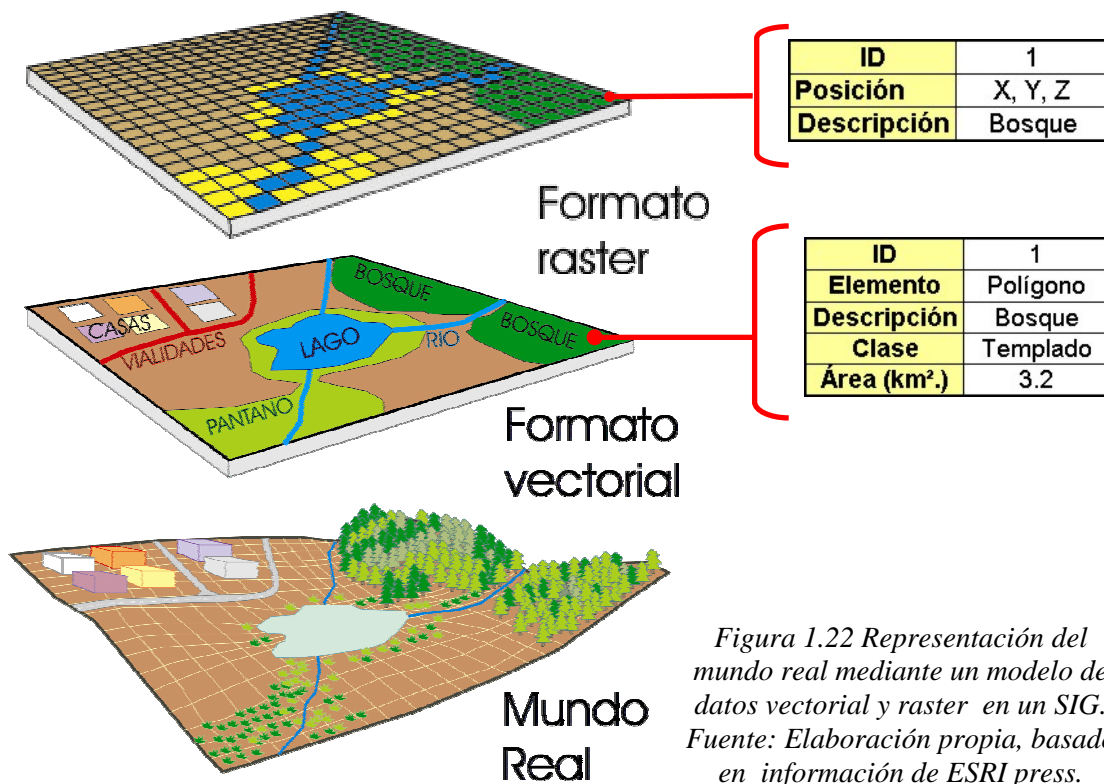


Figura 1.22 Representación del mundo real mediante un modelo de datos vectorial y raster en un SIG. Fuente: Elaboración propia, basado en información de ESRI press.

En ambas estructuras de datos será necesario que queden reflejadas las relaciones espaciales de los elementos entre sí, lo cual se conoce en el área de las matemáticas como topología. Aplicando esta definición en los SIG, sería la relación que cada objeto geográfico tiene con los de su entorno, como podría ser contigüidad, conectividad, inclusión, etc. (Lantada Z. y Núñez A., 2004).

La codificación vectorial de la información en los SIG esta orientada a dos tipos de estructuras, la arco-nodo y la orientada a objetos, ambas se ajustan perfectamente a los principios de la teoría de los grafos, pues este formato de información espacial considera a la realidad como una reunión de objetos discretos en función de su posición: los puntos, líneas y polígonos asumen un espacio geográfico continuo que cumplen los postulados de la geometría euclidiana. Cualquier entidad que aparezca en el espacio (casas, carreteras,

bosques, lagos, etc.) puede modelarse a la escala adecuada mediante un objeto geométrico. En la figura 1.22, se muestra un ejemplo de una estructura de datos vectorial.

La utilización de bases de datos como plataforma para el desarrollo de los SIG permite las funciones de manipulación y análisis. En las organizaciones se ha incrementado notablemente en los últimos años debido a las ventajas que ofrecen en la toma de decisiones, algunas son:

- Globalización de la información: permite a los diferentes usuarios considerar la información como un recurso corporativo que carece de dueños específicos.
- Eliminación de información inconsistente: si existen dos o más archivos con la misma información, los cambios que se hagan a éstos se actualizan en todas las copias del archivo.
- Mantienen la integridad en la información: lo que es una cualidad altamente deseable y tiene por objetivo que sólo se almacena la información correcta.
- Independencia de datos: este concepto es quizá el que más ha ayudado a la rápida proliferación del desarrollo de los Sistemas de Bases de Datos. La independencia de datos implica autonomía entre programas y datos.

Con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica orientados a objetos y la implementación de la Geodatabase, ha surgido una nueva visión de la topología, como un conjunto de reglas y relaciones entre los elementos de una misma o distintas capas de información, que junto con un extenso número de herramientas y tareas de edición, permiten modelar de manera más veraz las entidades presentes en el mundo real. Con esta nueva visión, la topología puede seguir siendo empleada para asegurar que los elementos asociados geoméricamente forman una estructura bien definida, pero de manera adicional se asegurará que los elementos cumplen una serie de reglas predefinidas, lo que permite una gran flexibilidad en el diseño de los modelos de datos. Por ejemplo, con la generación de topología en una capa de líneas (calles), se eliminarán los nodos colgados (“dangles”) dentro de la tolerancia definida y se generarán nodos en los cruces.

Los requisitos topológicos básicos en un SIG con modelo de datos vectorial son:

- a) Los nodos de dos arcos en contacto deben tener las mismas coordenadas.
- b) Un polígono se define como un circuito perfecto de líneas que puede recorrerse entero empezando y terminando en el mismo punto sin pasar dos veces por la misma línea.
- c) Existe un sólo identificador para cada objeto y éste no se repite.
- d) Se dispone de alguna forma para codificar los polígonos isla, que son los polígonos que se encuentran completamente rodeados por otro polígono. (vea la representación del lago en la imagen 1.22).

En la siguiente figura (1.23) se muestra la codificación de un mapa típico de redes y polígonos en un sistema de información geográfica en formato vectorial utilizando reglas topológicas: los arcos están numerados del 1 al 11 y están asociados a los 7 nodos y 5 polígonos. El hecho de que cada uno de los nodos cuente con la codificación de sus coordenadas (x, y) permite identificar espacialmente todos los elementos de un mapa, esto

facilita el uso de las matemáticas relacionadas con la teoría de grafos; la representación de redes, operaciones de conjuntos y la supresión de líneas.

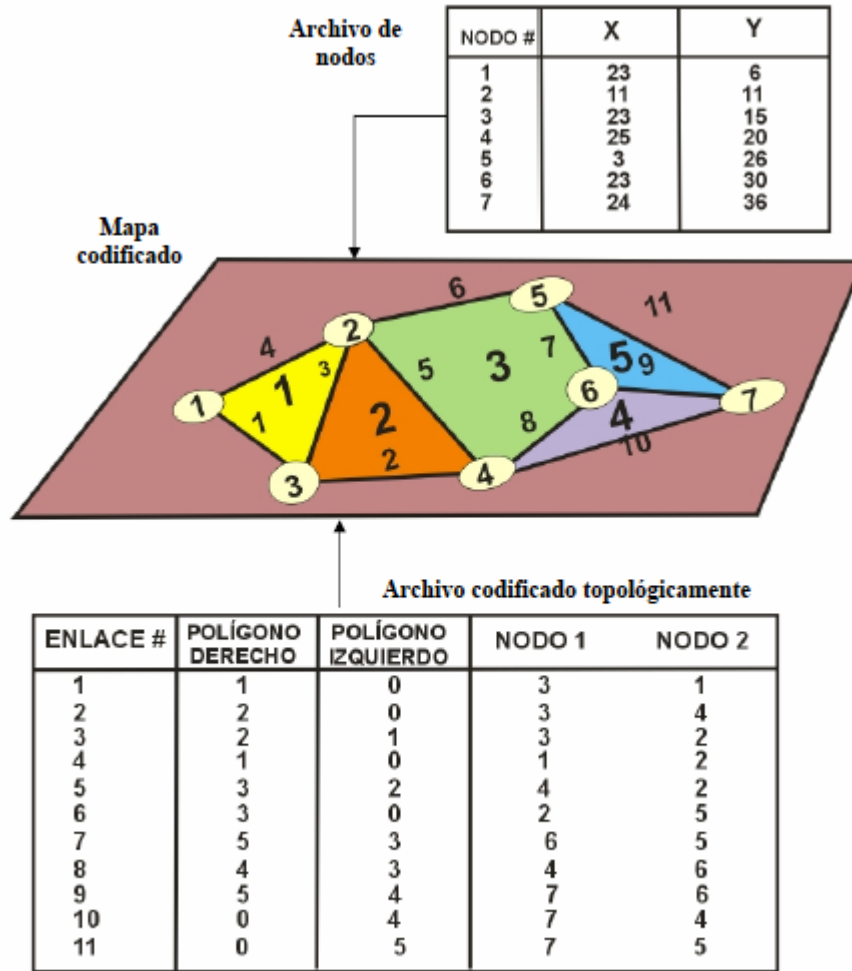


Figura 1.23 Sistema de codificación vectorial utilizando el concepto de topología proveniente de la teoría de los grafos. Fuente: ESRI Press (1995)

En la figura anterior (1.23) se distingue otra componente sobre el que se basan el despliegue, los análisis y resultados producidos con un Sistema de Información Geográfica: las bases de datos (espaciales y descriptivos) georrelacionadas. Una base de datos georrelacional es básicamente un conjunto de tablas, similares a las de una hoja de cálculo, formadas por registros y campos. Los registros representan cada uno de los objetos espaciales contenidos en una región geográfica y los campos los atributos (variables) de los objetos. En esta estructura de datos, las tablas de los diferentes objetos comparten algún campo entre ellas, cuestión que sirve para establecer relaciones que permitan consultas complejas y álgebra de mapas. Esta estructura permite combinar en un mismo sistema información con orígenes y formatos muy diversos incrementando su complejidad.

En los SIG las funciones de representación gráfica y la cartografía automatizada tienen como labor integrar a las otras funciones en una sola operación que permita interpretar los

resultados y obtener un producto cartográfico. Para llevar a cabo esta tarea, se sustentan en la cartografía.

Existen también funciones de distribución de la información en los SIG. En ellas destacan 2 rubros: 1) El uso de servicios de internet para la publicación de mapas en tiempo real donde el usuario puede generar mapas personalizados y 2) El desarrollo de interfases personalizadas que se adecuen perfectamente a las necesidades del usuario.

En la siguiente tabla (1.1) se muestra la relación entre los componentes y las principales funciones de los Sistemas de Información Geográfica.

Componentes de los SIG, funciones y su relación	Personal	Datos	Equipo	Programas	Modelos	Información
Codificación Formato de representación (espacial y datos)	×	×	×	×	×	Considerada como dato
Manipulación Espacial, temática o temporal	×	×	×	×	---	×
Análisis Búsqueda, operaciones y modelación	×	×	×	×	×	×
Representación Visualización y cartografía	×	---	×	×	---	×
Distribución Servicios en línea e interfases personalizadas	×	---	×	×	×	×

Tabla 1.1 Relación entre los componentes de los SIG y sus principales funciones.

Fuente: elaboración del autor.

La tabla anterior se interpreta de la siguiente manera:

- El personal, el equipo y los programas están presentes en todas las funciones, son componentes indispensables por la naturaleza de los SIG.
- La información esta presente en todas la funciones menos en la etapa de codificación.
- Los datos son necesarios en las funciones de codificación, manipulación y análisis.
- Los modelos estructuran las etapas de codificación y distribución además de producir información en la etapa de análisis.

Aplicaciones de los SIG en distintos sectores

El valor agregado que proporciona un proyecto de SIG puede obtenerse siempre que se trate de un planteamiento con información de carácter espacial. Las áreas y enfoques de aplicación son muy diversos, por ejemplo:

- Abastecimiento de agua.
- Abastecimiento de energía.
- Biodiversidad.
- Catastro.
- Censo y límites municipales-administrativas.
- Codificación de direcciones.
- Defensa-Inteligencia.
- Gobierno local.
- Geología.
- Hidráulica.
- Instalaciones reguladas ambientalmente.
- Localización de sitios.
- Mapas base.
- Marina.
- Petróleo.
- Preservación histórica y arqueología.
- Salud.
- Seguridad pública.
- Silvicultura.
- Telecomunicaciones.
- Tuberías.
- Transporte.

Puesto que el campo de aplicación es vasto, mencionaré a continuación algunos proyectos en los cuales la tecnología SIG ha funcionado con éxito (American Society of Civil Engineers, 2005).

- Planeación urbana, del transporte y mantenimiento de caminos.
- Cálculo de la demanda potencial de usuarios de transporte público.
- Estudios de: accesibilidad a los servicios, impacto por obras viales.
- Localización óptima de infraestructura.
- Prevención de desastres y programas de protección civil.
- Evaluación de impactos ambientales.
- Mapeo de inundaciones y de zonas de riesgos.

Es importante mencionar que los ejemplos anteriormente citados son sólo algunos, continuamente se descubren nuevas aplicaciones de esta tecnología.

Importancia de los SIG-T

Los Sistemas de Información Geográfica para el Transporte son sistemas especializados en aplicar los principios teóricos y tecnologías de información geográfica a problemas de transporte (Miller y Shaw, 2001). En el ámbito, son conocidos como SIG-T (GIS-T por sus siglas en inglés). La investigación de los SIG-T está orientada en dos direcciones complementarias (Shaw, 2002):

- 1) Desarrollo y mejora de los SIG con el fin de satisfacer las necesidades de otras aplicaciones de transporte.
- 2) Uso de los SIG para facilitar y mejorar los estudios de transporte

En general, los temas relacionados con los estudios de los SIG-T pueden agruparse en tres categorías generales que incluyen temas de ingeniería y geografía del transporte:

- Representación de los datos. ¿Cómo pueden representarse los numerosos componentes de los sistemas de transporte en un SIG-T?
- Análisis y modelación. ¿Cómo pueden ser utilizadas las metodologías de transporte en un SIG-T?
- Aplicaciones. ¿Qué tipo de aplicaciones son particularmente convenientes para los SIG-T?

En la siguiente figura (1.24), en la parte izquierda se conceptualizan las relaciones entre los componentes principales de los SIG. A la derecha se representa un modelo de datos para un sistema de transporte mediante tres capas vectoriales: uso de suelo, flujos (interacciones espaciales) y la red. Cada capa tiene sus propios elementos y datos relacionados y es producto de la relación entre los componentes.

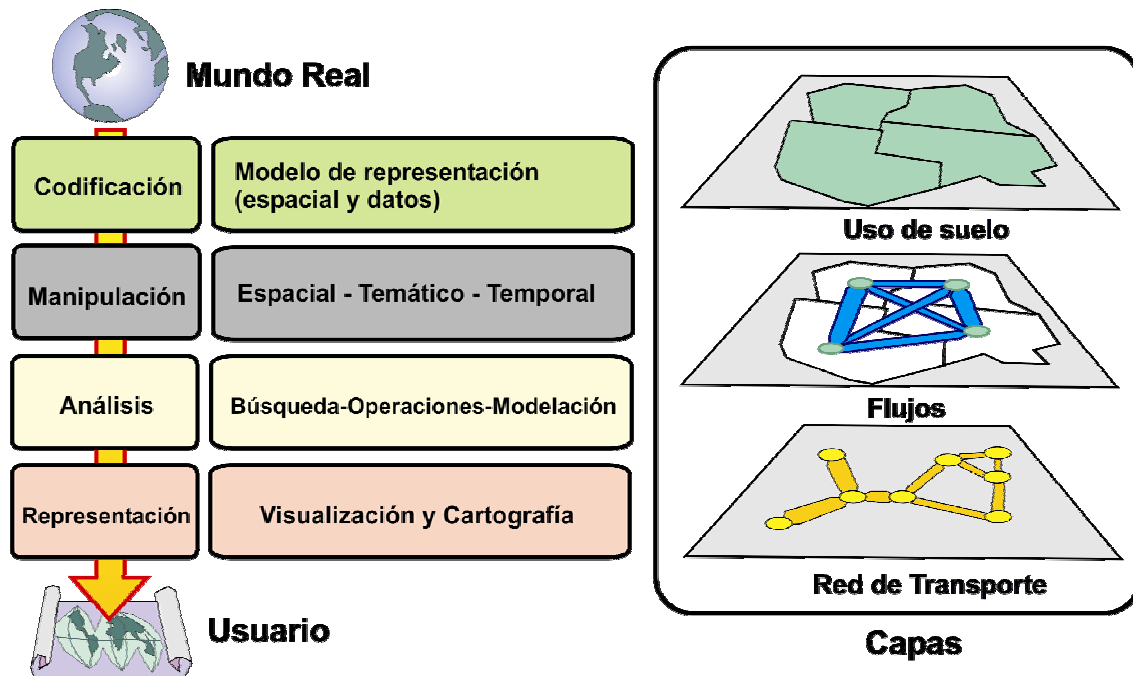


Figura 1.24 Componentes principales de un Sistema de Información Geográfica.

Fuente: <http://www.people.hofstra.edu/geotrans>

Los cuatro componentes principales de los SIG (codificación, manipulación, análisis y representación) resultan en la generación de nueva información que sirve de apoyo a la toma de decisiones y tienen consideraciones específicas para el transporte:

Codificación. Referente a la representación del sistema de transporte y sus componentes espaciales. Para utilizar una red de transporte en un SIG, ésta debe estar correctamente codificada, esto implica que cuente con una topología funcional compuesta por arcos y nodos. Las bases de datos vectoriales disponibles por diversas fuentes en México pueden utilizarse para modelar grafos, sin embargo necesitan ser preparadas, pues generalmente no tienen una construcción topológica adecuada. Otros elementos relevantes

en el transporte son los datos cualitativos y cuantitativos, que también deben estar codificados y asociados con sus elementos espaciales respectivos. Por instancia, un segmento codificado de un camino puede tener información referente a su ancho, número de caminos, dirección, tránsito en hora pico, etcétera.

Manipulación. La información codificada es almacenada con una estructura y puede organizarse en varias formas: espacialmente (por región, país, distritos censales, etc.); temáticamente (por camino, tránsito, terminales, etc.); o por consideraciones temporales (por año, mes, semana, etc.). Este proceso debería ser automático y tener convenciones establecidas. Por instancia las agencias gubernamentales deben utilizar formatos específicos y desplegar su información mediante consideraciones predeterminadas: espacialmente por jurisdicción, temáticamente por el campo de interés y temporalmente por la frecuencia de la colección de datos.

Análisis. Incluye una amplia gama de herramientas y metodologías sobre los temas de transporte. Pueden ir desde una simple búsqueda estructurada sobre un elemento del sistema de transporte (p. ej. ¿cuál es la hora de máxima demanda de un segmento de camino?) hasta un complejo modelo que investigue las relaciones entre sus elementos (p. ej. si se agrega un nuevo segmento de camino, ¿cuál puede ser el impacto sobre el tránsito y desarrollo de futuros usos de suelo?). En la figura de abajo (1.25) se representa la complejidad y los requerimientos de información de cuatro modelos de la geografía del transporte.

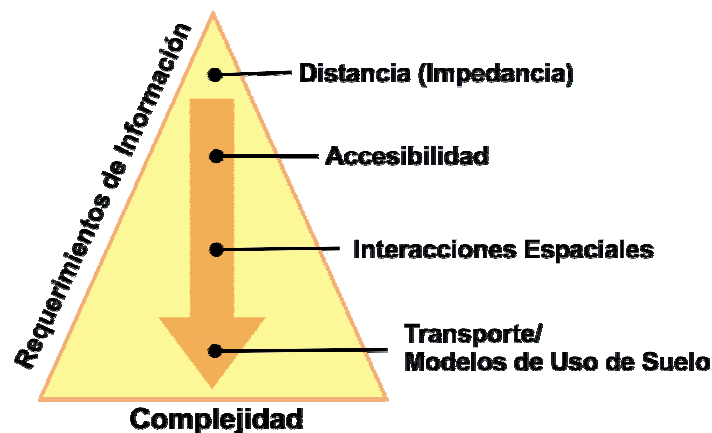


Figura 1.25 Complejidad de la modelación espacial de temas de transporte.

Fuente: <http://www.people.hofstra.edu/geotrans>

Representación. Un SIG no está completo sin sus funciones cartográficas y de visualización. Este componente es particularmente importante pues proporciona la posibilidad de mostrar con un formato gráfico información compleja. Un GIS-T se convierte así en una herramienta para informar y convencer a los actores involucrados en la toma de decisiones quienes de otra forma no tendrían el tiempo o la capacidad de hacer una interpretación no simbólica de la información.

Distribución de la información. La tecnología de los SIG-T se ha incorporado paulatinamente a los sistemas de comunicación global. Actualmente existen servicios en

línea en otros países donde es posible consultar las rutas de transporte público de una ciudad para que el usuario planee sus itinerarios, encontrar direcciones ingresando los nombres de calles y código postal (*online geocoding*), localizar sitios mediante mosaicos de fotografías aéreas (Google Earth por ejemplo), realizar análisis espacial a través de internet (ESRI, Business Analyst Online por ejemplo). La tendencia en estos servicios es la vinculación a los servicios móviles, como el caso de la telefonía celular y las computadoras de bolsillo. En México, el desarrollo de esta tecnología se encuentra en sus inicios, el mejor ejemplo es el trabajo realizado por el Instituto Mexicano del Transporte con el perfeccionamiento de su Sistema de Información Geoestadística para el Transporte (SIGET). El objetivo general de este proyecto es diseñar, estructurar e implementar un sistema informático para el registro, análisis y representación de la información geográfica y estadística asociada al sistema de transporte mexicano.

Contribución de los SIG-T en la Cadena de Valor de una organización

Los SIG, aunque requieren inversiones económicas fuertes debido a la especialización del personal y el costo de las bases de datos, proporcionan un alto valor agregado en la práctica. El concepto de la Cadena de Valor distingue las operaciones de las organizaciones en dos partes:

- Las operaciones de Línea (parte inferior), que son las operaciones propias que tienen que ver con los procesos de creación de valor.
- Las operaciones de soporte, donde las acciones de la línea se apoyan para coordinarse y compartir la información.



Todas las actividades de la organización sean de soporte o de línea, recogen y generan información, que es recopilada por el SIG, que a su vez la redistribuye a las actividades de la cadena de valor que necesitan dicha información, coordinando las acciones tanto en actividades básicas, como las acciones de control que puedan ser necesarias (necesidades de proyecto, productividad.)

En muchos casos los vínculos entre actividades pueden explotarse conjuntamente para obtener ventajas competitivas, o bien reconfigurar los objetivos de la organización, añadiendo nuevos enfoques. Además el SIG distribuye la información necesaria para tomar decisiones o implementar acciones en las distintas actividades de la Cadena de Valor, independientemente de las actividades donde se genere. Por todo ello podemos afirmar que la información que maneja el SIG, aunque generada o utilizada para/por actividades concretas, no pertenece a ninguna actividad en particular, sino a la organización considerada globalmente. Muchas veces las distintas actividades de la Cadena de Valor pueden utilizar volúmenes importantes de información que ninguna otra área en la organización necesite, aparecen entonces los subsistemas de información (SSIG) circunscritos a una o varias actividades concretas. En estos casos el SSIG debe estar planificado y diseñado según las perspectivas de dicha actividad, y no dentro del conjunto del SIG (por ejemplo, el software y la programación de las computadoras utilizadas para codificar los datos), para ser considerados SSIG deben de ser independientes y pertenecer a una actividad concreta de la Cadena de Valor, aunque utilicen la información de otras actividades o del SIG.

En la siguiente tabla (1.2) se ejemplifican algunas aplicaciones de los SIG en temas de transporte:

ÁREA	APLICACIÓN
Logística interna	Optimización del uso de almacenes; modelación de la logística.
Ventas y Marketing	Herramienta para análisis de mercados; simulación de la dispersión de productos nuevos; marketing y anuncios dirigidos.
Servicios	Planeación de rutas; mantenimiento de redes de distribución, envíos, pronósticos de mantenimiento, mapeo de señalización, alumbrado público y condiciones de infraestructura.
Operaciones	Mejora del contenido espacial de un proceso o producto.
Logística externa	Planeación de rutas, manejo de flotas, asistencia en entregas
Salud pública	Localización de patrones de accidentes de tránsito para la generación de políticas de seguridad.
Análisis de Riesgos	Identificación de riesgos a infraestructura y servicios de transporte, diseño de rutas de emergencia.

*Tabla 1.2 Algunas aplicaciones de los SIG en el transporte.
Fuente: adaptado de Hendriks (1998).*

Los Sistemas de Información Geográfica facilitan dentro de la Cadena de valor la gestión las diferentes actividades, integrándolas y coordinándolas, existiendo una constante comunicación y relación en toda la información; todo ello gracias a la unificación con otras funcionalidades y herramientas específicas de cada sector.

El análisis geográfico en la industria de los transportes **es la clave para tomar decisiones** en sus principales necesidades⁷:

- Gestión del tránsito, ya sea del viajero o carga transportada.
- Gestión de infraestructura, planificación.
- Gestión de la flota y logística.
- Análisis sobre el comportamiento de los mercados y clientes potenciales.
- Gestión de sistemas de emergencias y de seguridad.
- Análisis de impactos ambientales.

⁷ extraído de ESRI, España.

Cabe mencionar que día con día surgen nuevas aplicaciones de los SIG en todas las ramas del conocimiento, producto de la tendencia creciente de incorporar al estudio de problemas complejos la componente espacial.

El uso de los SIG-T para modelar el espacio en el transporte

Actualmente el uso de la tecnología de cómputo es fundamental en para la modelación de sistemas espaciales, desde la integración de la información básica, el proceso de cálculo, el análisis y representación de los resultados. Hace no mucho tiempo, los análisis de interacción (como los gravitacionales o los de potenciales) se realizaban con ayuda de hojas de cálculo, sin embargo resultaba complicado modelar sistemas espaciales extensos, por lo que el paso obligado fue incorporar la tecnología de los SIG como herramienta para la modelación. En principio los SIG comerciales no estaban diseñados con módulos y comandos automatizados que facilitaran la modelación de las interacciones espaciales, sin embargo con el auge de este tipo de tecnología y la introducción de diversos profesionistas en su manejo, las compañías de software han identificado este nicho de mercado y han producido SIG especializados, con orientaciones diversas, en transporte como es el caso de *Transcad* de la compañía Caliper, y en geomarketing la compañía ESRI y Mapinfo por sólo nombrar las más conocidas. La utilidad de estas aplicaciones es innegable y sin lugar a dudas la calidad y transparencia de los resultados justifican su uso, sin embargo existen casos en los que el proceso de modelación se convierte en una caja negra, se tienen limitantes para representar la problemática o simplemente no se cuenta con la licencia para utilizar el software. Por estas razones, el presente trabajo de investigación propone una metodología para utilizar este modelo en un SIG, haciendo énfasis en la capacidad del modelador.

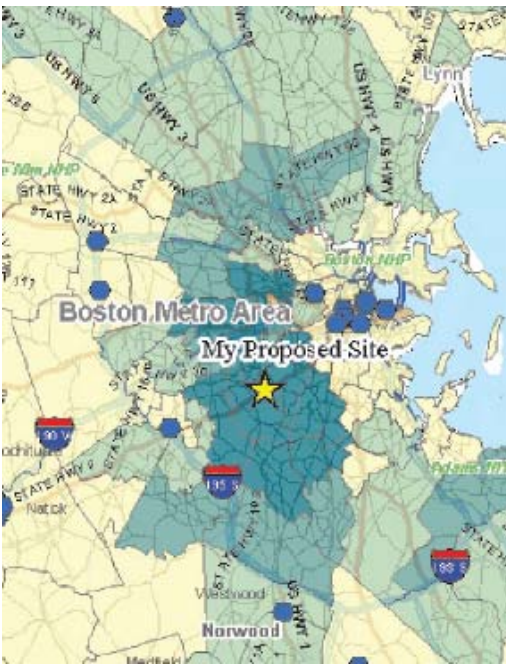


Fig. 1.26 *Business Analyst* para ArcGis 9.
Fuente: *esri.com*

Para modelar la interacción gravitacional actualmente el modelo probabilístico de Huff esta a disposición como extensión de varios paquetes de SIG comerciales, entre los que resaltan ESRI con *Business Analyst* (figura 1.26) y Mapinfo con *Vertical Mapper* (figura 1.27).

Los resultados del modelo computados en un SIG son frecuentemente representados como contornos de probabilidad y son interpretados, por instancia, que la persona en la localización X tiene el 0.9 de probabilidad de ir a la alternativa más cercana a consumir, mientras que la persona en la localización Y tiene una probabilidad de 0.2 de ir a la misma alternativa.

En la siguiente figura (1.27) se muestra un mapa de probabilidad de interacción realizado con el paquete comercial Mapinfo v. 7.8. En este mapa se muestran los resultados de un análisis de localización a escala urbana para una tienda utilizando el modelo de probabilidad de

interacción de Huff (valor representado mediante isolíneas en color negro). Este indicador se obtuvo modelando la cantidad de posibles consumidores (masa 1) y las tiendas (ponderadas por su volumen de ventas, que es la masa 2, representada por rombos verdes en la figura), considerando la distancia euclidiana para cada elemento del sistema como función de separación espacial. Los colores cálidos representan las probabilidades más altas y los fríos las más bajas.

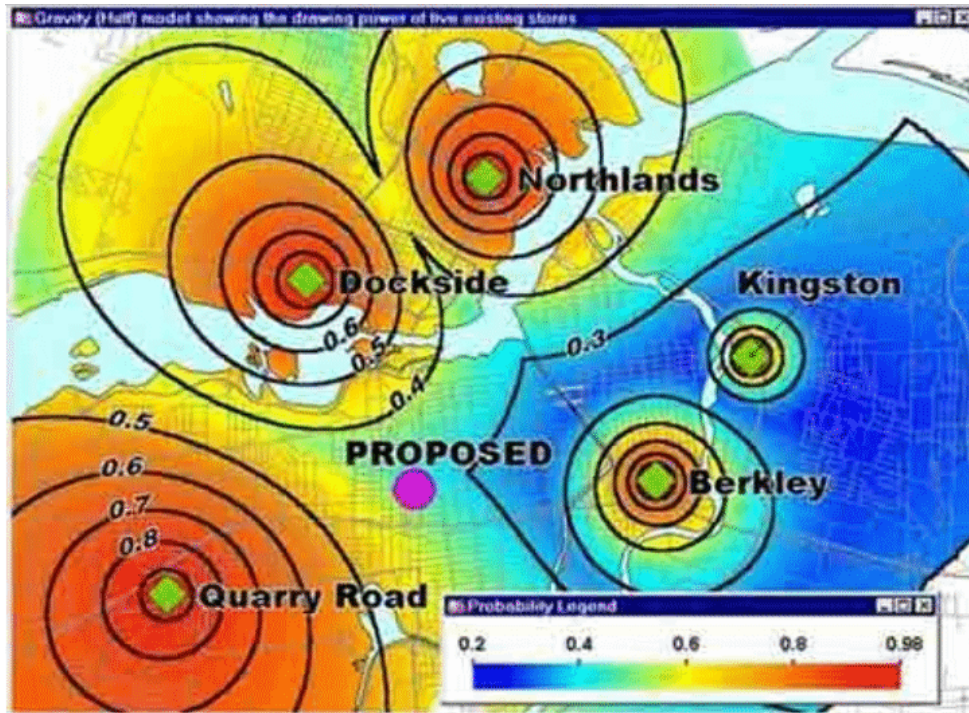


Figura 1.27 Mapa de probabilidades de interacción generado en un SIG comercial. Fuente: mapinfo.com

Como se observa en la figura 1.27, el criterio para la localización para la nueva tienda (círculo magenta con la leyenda “PROPOSED”) es conservar el mayor índice de interacción posible que se encuentre a la mayor separación de las otras tiendas.

Los resultados obtenidos con estas herramientas comerciales muchas veces no son entendibles por la mayoría de los usuarios, ya que requieren un respaldo conceptual amplio e implican un costo extra, además en ocasiones estos productos no cubren en su totalidad las necesidades y expectativas de los proyectos. Por ejemplo, para el caso anterior expuesto en la figura 1.27, la función de separación espacial considerada para el cálculo fue la distancia euclidiana y en caso de que el usuario requiriera un modelo con mayor exactitud (como considerar tiempo sobre la red o costo de transportación) habría un impedimento pues el módulo programado en el software comercial únicamente acepta estos valores.

El propósito fundamental de esta investigación es proporcionar una metodología que permita a diversos profesionistas familiarizados con las herramientas de los SIG ampliar su marco conceptual para poder generar sus propias modelaciones gravitacionales desde la perspectiva del análisis espacial. Como se observará a lo largo de los siguientes capítulos,

es posible realizar modelaciones poco usadas por los ingenieros de transporte con resultados interesantes mediante una combinación de la habilidad teórica-práctica de herramientas que están incluidas en los SIG como: análisis de redes para rutas óptimas, operaciones de geoprecesamiento, funciones de cálculo y búsqueda estructurada, interpolación de puntos, despliegue gráfico, entre muchos otros.

El manejo de esta perspectiva implica una gran ventaja pues ya no se dependería de las aplicaciones desarrolladas por las empresas, pues proporciona una pauta para el desarrollo de software propio que incluya módulos “hechos a la medida” que satisfagan los requerimientos de los proyectos y utilicen la información disponible producto de los estudios en campo.

En el siguiente capítulo, con base en esta primera investigación, se analizará la teoría de grafos y los aspectos básicos para modelar las interacciones en un sistema de información geográfica.

2

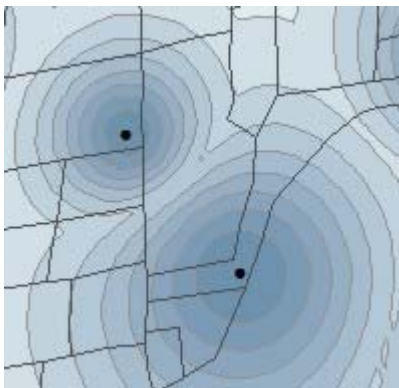
MODELOS PARA EL ANÁLISIS DE LAS INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS

Objetivo: Explicar diversos modelos espaciales para fundamentar la aplicación del modelo gravitacional dentro del marco del análisis espacial.

2.1 Antecedentes y teoría de grafos

Antes de profundizar en el origen del modelo gravitacional de interacción, es necesario explicar los siguientes conceptos: *Gradiente espacial*, la *Teoría de los grafos* y los *Sistemas de Información Geográfica*.

Gradiente espacial



Por gradiente espacial se entiende la variación de intensidad de un fenómeno por unidad de separación espacial entre un lugar y un centro dado¹. Al disminuir los intercambios y las influencias entre dos lugares conforme aumenta la separación, las reparticiones de un gran número de objetos se ordenan en el espacio en forma de gradientes constituidos alrededor de un centro, o incluso a los lados de un eje (semejante al área buffer² de una línea).

Existen infinitud de tipos de gradientes, algunos son:

Gradientes de densidad, como los poblacionales que se constituyen alrededor del centro de una ciudad, o como los que aparecen a los lados de ciertas vías de circulación, o incluso a partir de barreras físicas como los litorales. En esta clasificación también se encuentran los gradientes de densidad de equipamientos, comercios o de servicios. En la figura siguiente (2.1) se muestra un mapa de isócronas a

¹ Vea *teoría centro-periferia* en el capítulo anterior.

² En un Sistema de Información Geográfica, un buffer es un polígono que encierra el área resultante de una distancia especificada en torno a un punto, línea o polígono.

cada hora sobre la red pavimentada a partir de las principales zonas metropolitanas de la región centro de nuestro país, posteriormente se hizo el análisis de densidad con la población contenida dentro de estos polígonos para determinar su distribución horaria a partir de estas ciudades. En la figura se distingue claramente la variación en la intensidad de área poblada, a esto se le conoce como un gradiente poblacional.

Figura 2.1 Mapa de isócronas a cada hora con densidad de población. Fuente: elaboración propia.



Gradientes económicos, como la variación en la distribución espacial del poder adquisitivo, de los costos de transportación.

Gradientes físicos, como la variación de la temperatura a diferentes elevaciones, o la intensidad de contaminación en los medios acuosos, etcétera.

En general, para cualquier tipo de gradiente, la distribución espacial de las intensidades depende de dos factores: la fuerza de atracción (o de repulsión) y la capacidad de polarizar y de difundir la vecindad. La existencia de un gradiente en el espacio asocia siempre la idea de *diferencia espacial* y de *discontinuidad*, además son una forma de organizar la heterogeneidad del espacio.

Ahora es importante hablar sobre el *gradiente de las interacciones espaciales* como resultado de la separación espacial. Este fenómeno se comporta exponencialmente y se explica mediante tres supuestos:

- 1) La resistencia para superar la separación, y
- 2) El aumento considerable en el número de interacciones posibles conforme aumenta la separación espacial superada de un lugar dado, que dificulta la elección.

Este tipo de gradientes son una imagen del efecto de la separación espacial sobre el conjunto de las interacciones espaciales y son la expresión de la pertenencia de los lugares a campos de fuerza que se extienden en diferentes escalas.

Para explicar este último punto, imagine un espacio teóricamente homogéneo desde el punto de vista de la separación espacial (distancia, tiempo, costo, etc.) de localizaciones posibles (Figura 2.2-a). La capacidad de migrar una unidad de separación implica la posibilidad de interactuar con 8 destinos diferentes (b); si a esto se le añade la capacidad de

migrar dos unidades significa la posibilidad de interacción con cuatro destinos más, dando un total de 12 destinos (c); si la capacidad de recorrer la separación es triple implica poder visitar doce destinos más (d); 16 más si se cuadruplica (e) y así consecutivamente (f).

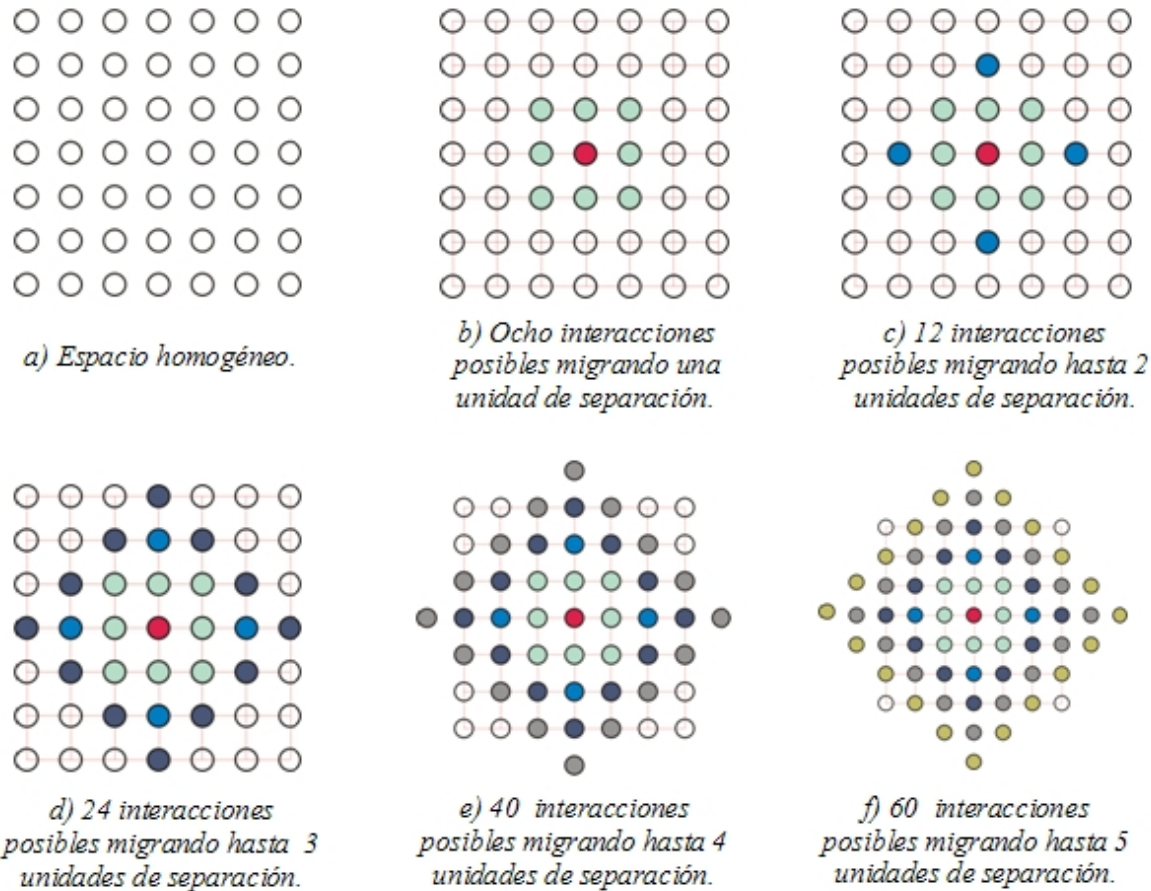


Figura 2.2 Efecto de la separación espacial sobre la probabilidad de interacción.
Fuente: Elaboración propia.

Durante largo tiempo, los primeros modelos de interacción y de posición postularon la existencia de una relación matemática simple entre el alejamiento físico de los lugares (medido por una métrica continua) y el volumen o la intensidad de las relaciones que se establecía o que podía establecerse entre ellos.

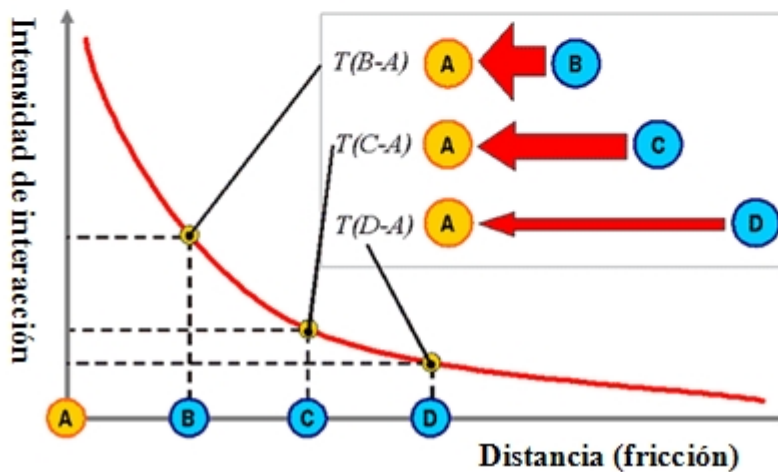
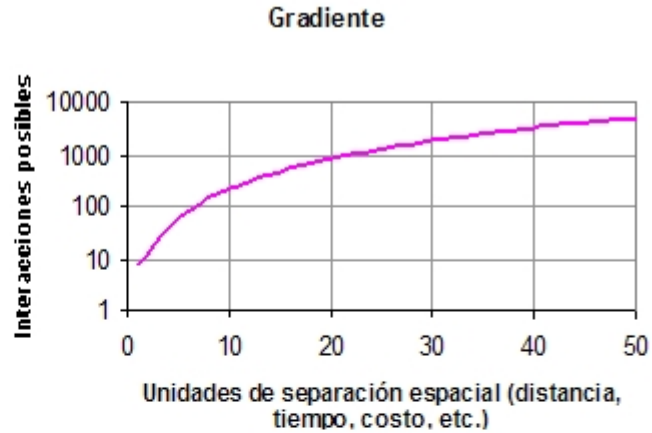
La figura 2.3 muestra una relación clásica exponencial (no lineal) entre la distancia y la intensidad de las interacciones en un sistema de localidades (A con otras localidades: B, C y D). Asume que cada localidad tiene el mismo nivel de complementariedad y que no existen oportunidades alternativas³. La localidad más cercana, B, tiene el nivel más alto de interacción con la localidad A, mientras que las localidades C y D tienen los niveles más bajos de interacción puesto que se localizan más lejos.

³ Vea el apartado 1.1.3, “Condiciones para las interacciones espaciales”.

En la siguiente gráfica (2.1) se representa el fenómeno del aumento en el volumen de las interacciones.

Gráfica 2.1 Comportamiento exponencial del gradiente de interacción espacial: Existe mayor posibilidad de interactuar conforme aumentan las unidades de separación espacial superadas.

Fuente: Elaboración propia



*Figura 2.3
Relación de la distancia con las interacciones en un sistema.*

*Fuente:
Elaboración propia.*

La incorporación del fenómeno de gradiente es la base de todos los modelos de interacción espacial pues explica el hecho de que la probabilidad de interactuar con lugares cada vez más lejanos decrece muy rápido en función de la separación espacial, a menos que los intercambios sean mayores entre las regiones para que tengan mayor peso. En correspondencia, si estos flujos son menores, las interacciones tenderán a ser más débiles si éstas están más alejadas, vea la figura 2.4.

Actualmente para modelar los gradientes de interacción se utilizan las siguientes funciones:

- *Funciones de resistencia.*- También llamadas funciones de impedancia las cuales consideran las características espaciales específicas del fenómeno al cual corresponde la distribución espacial. En lugar de la simple consideración de la distancia euclidiana (distancia en línea recta) incluyen diferentes medidas de resistencia como son: la distancia de viaje expresada en kilómetros sobre la red, el tiempo de viaje y el costo del mismo.
- *Funciones potenciales de impedancia.*- Representan la atracción relativa de cada zona. Como una alternativa a este tipo de funciones se puede usar un factor de impedancia, que esencialmente es una función de impedancia discreta que relaciona la resistencia entre zonas con la atracción entre zonas.

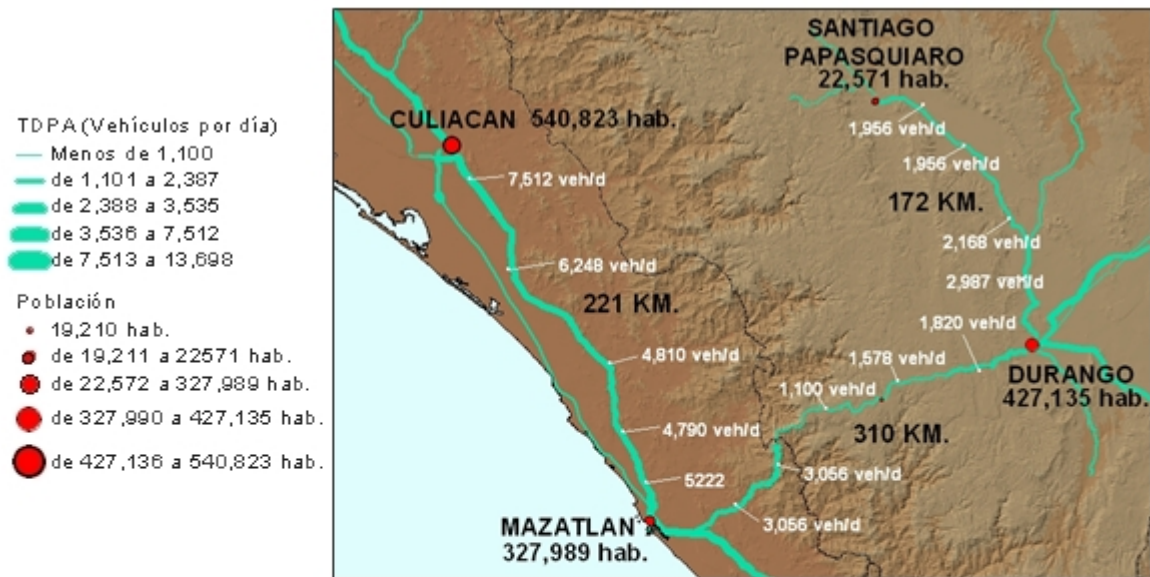


Figura 2.4 Gradiente del tránsito diario promedio anual (TDPA) en un sistema de localidades. La hipótesis acerca de la influencia que tiene la masa sobre la distancia en las interacciones es demostrada: mientras que la intensidad del flujo entre la ciudad de Durango y Mazatlán (a 310 km. de separación con la sierra de por medio) decrece en función de la distancia, se observa que la interacción entre Mazatlán y Culiacán es mayor y es menos afectada por la distancia (a 221 km. de separación). Un factor importante es la influencia que tiene sobre las interacciones la masa de las localidades (población). La mayor jerarquía de Culiacán incrementa los flujos a pesar de la distancia.

Fuente: Información proveniente del IMT e INEGI.

Teoría de los grafos

Como se mencionó en el capítulo anterior, una forma de modelar las interacciones es mediante los objetos vectoriales llamados grafos. Antes de explicar los fundamentos de esta teoría, es conveniente mencionar su origen.

En 1736, el matemático suizo Leonhard Euler publicó el artículo "Solución a un problema referente a la posición" en el que resolvía en su caso general el problema conocido como los siete puentes de Königsberg (Vea la figura 2.5 de la derecha). Este trabajo es considerado como el nacimiento de la teoría de los grafos, utilizada ampliamente hasta la fecha en una multiplicidad de aplicaciones, y también como una de las primeras apariciones de la llamada "nueva geometría" en la que importan las propiedades estructurales de un objeto y no sólo sus medidas. A esto se refieren las palabras «geometriam situs» en el título de Euler.

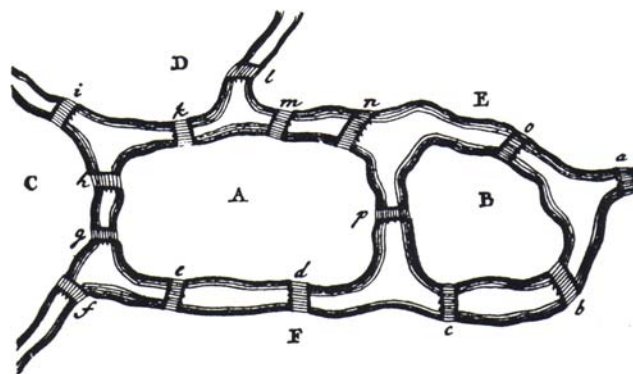


Figura 2.5: Representación del problema de los siete puentes de Königsberg. Fuente: Euler, 1736.

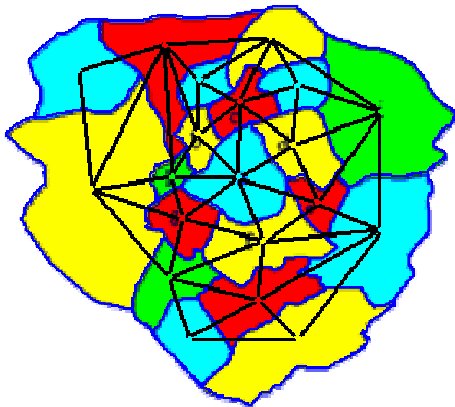


Figura 2.6: Representación del problema de los cuatro colores.
Fuente: Haken, 1977.

En 1852 Francis Guthrie planteó el problema de los cuatro colores al preguntar si es posible, utilizando solamente cuatro colores, iluminar cualquier mapa de regiones de tal forma que dos regiones adyacentes nunca tengan el mismo color, considerando que las regiones se dicen *adyacentes* si comparten un segmento de borde en común, no solamente un punto. Este problema fue resuelto hasta un siglo después por Appel y Haken (1977) con ayuda de la capacidad de procesamiento de las computadoras. Al resolver este problema, los matemáticos inventaron muchos términos y conceptos teóricos fundamentales de los grafos.

Esta línea de investigación originó el término *topología* (Lefschetz, 1942). Mientras que la geometría se ocupa de propiedades como la posición, distancia absoluta y las rectas paralelas, la topología se ocupa de propiedades como la posición relativa y la forma general.

En matemáticas, la teoría de los grafos estudia las propiedades de dos tipos de colecciones de objetos vectoriales: los vértices que son un conjunto de puntos también llamados nodos o vértices (V) conectados por ligas llamadas arcos o aristas (A) que pueden tener orientación, es decir, una dirección asignada. La expresión matemática de un grafo es $G = (V, A)$. Los grafos permiten estudiar desde problemas matemáticos abstractos hasta problemas de redes reales que serían difíciles de resolver de otra manera. La siguiente figura (2.7) muestra un grafo.

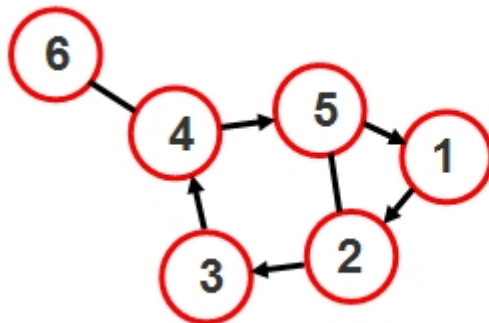


Figura 2.7.
Representación de un grafo.

Fuente: es.wikipedia.org

Isomorfismo de los grafos

En la teoría de los grafos la forma de los arcos y la posición de los nodos no es relevante, a estos cambios irrelevantes se llama *isomorfismos* (figura 2.8). Esto permite la modelación de sistemas complejos como redes de comunicación, sistemas de rutas, la red de agua en una ciudad, optimización de la distribución de mercancías y muchos otros.

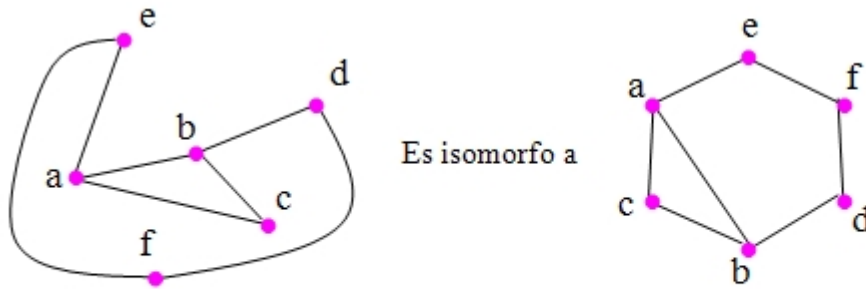


Figura 2.8
Representación
del isomorfismo
de un grafo.

Fuente:
es.wikipedia.org

En la figura superior, $V = \{ a, b, c, d, e, f \}$, y $A = \{ ab, ac, ae, bc, bd, df, ef \}$.

Sentido de los grafos

En algunos casos es necesario asignar un sentido a los arcos, por ejemplo, si se quiere representar la red de las calles de una ciudad con sus inevitables direcciones únicas. Los arcos son entonces pares ordenados de vértices, con $(a,b) \neq (b,a)$, y se define así grafos orientados, como el de la siguiente figura (2.9):

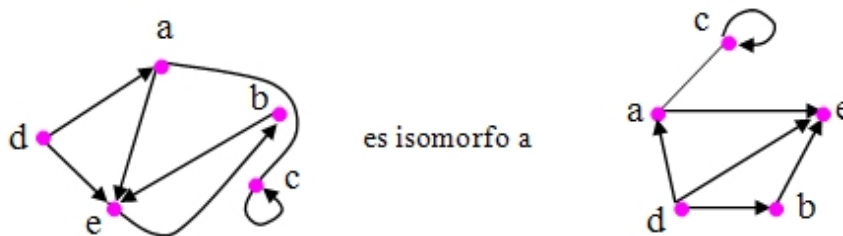


Figura 2.9
Representación
de los sentidos y
bucles en un
grafo.

Fuente:
es.wikipedia.org

En la figura anterior:

$V = \{ a, b, c, d, e \}$, y $A = \{ (a,c), (d,a), (a,e), (b,e), (c,a), (c,c), (d,b) \}$.

Los arcos no orientados se consideran bidireccionales para efectos prácticos. En el grafo de la figura anterior (2.9) se ha autorizado un arco que tiene su origen y final idénticos: es un rizo (también llamado bucle), también aparece un arco sin flecha: significa que se puede recorrer en cualquier sentido: es bidireccional, y corresponde a dos arcos orientados.

Para la modelación de las interacciones, los arcos pueden representar la separación espacial (ya sea en longitud, tiempo, costo, etcétera) entre un par de nodos donde uno representa el origen y el otro el destino.

Ponderación de los grafos

En muchos casos, es preciso atribuir a cada arco un valor específico, llamado valuación, ponderación o coste según el contexto, y se obtiene así un grafo valuado. Formalmente, es un grafo con una función $v: A \rightarrow R^+$.

Grafos fuente y pozo

Cuando de un nodo sólo salen arcos se le denomina nodo *fuentes* que (A en la figura 2.10), caso contrario, cuando a un nodo sólo entran arcos se dice que es un *pozo* (B).

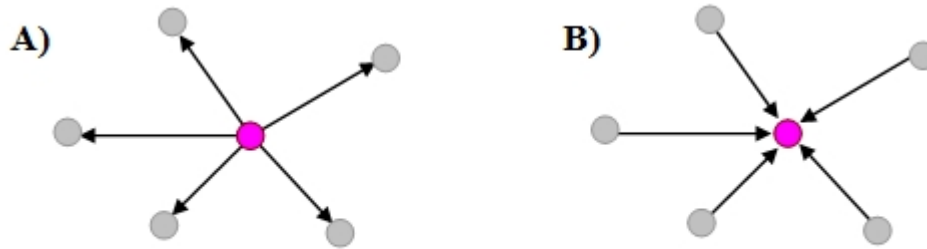


Figura 2.10 Representación de los nodos fuente y pozo. Fuente: elaboración propia.

Árbol de un grafo

Cuando un grafo no conforma un circuito y conecta a todos los nodos, se llama *árbol* (vea la siguiente figura, 2.11). En un grafo con n nodos, los árboles tienen exactamente $n - 1$ arcos, y hay $n-2$ árboles posibles. Su importancia radica en que los árboles son grafos que conectan nodos utilizando *el menor número posible* de arcos.

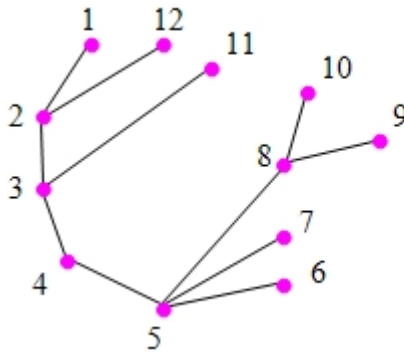


Figura 2.11 Grafo que conforma un árbol. Fuente: es.wikipedia.org

Un árbol (spanning tree) de un grafo es un subgrafo que contiene todos sus vértices o nodos. Un grafo puede tener múltiples árboles. Por ejemplo, un grafo completo de cuatro nodos (todos relacionados con todos) tendría 16 árboles.

A partir de este concepto, diversos autores han desarrollado algoritmos para la determinación de rutas óptimas.

Diámetro de un grafo

En un grafo, la distancia entre dos nodos es el menor número de arcos de un recorrido entre ellos. El diámetro en un grafo, es la distancia máxima entre dos nodos. Un diámetro infinito puede significar que el grafo tiene una infinidad de nodos o simplemente que no es conexo. También se puede considerar el diámetro promedio, como el promedio de las distancias entre dos nodos. Este concepto refleja mejor la complejidad de una red que el número de sus elementos. Por ejemplo, es aplicable el concepto de diámetro para internet, vista como un grafo cuyos nodos son los sitios y cuyos arcos son lógicamente los enlaces:

si se descartan los sitios que no tienen enlaces, y se escogen dos páginas web al azar, saber en cuántos clics se puede pasar de la primera a la segunda es el diámetro de la red.

Algoritmos importantes de la teoría de grafos.

Un algoritmo es un conjunto finito de instrucciones o pasos que sirven para ejecutar una tarea o resolver un problema a partir de ciertas reglas definidas. De un modo más formal, un algoritmo es una secuencia finita de instrucciones realizables, donde cada una tiene un significado preciso (no son ambiguas), cuya ejecución da una solución de un problema con una cantidad de esfuerzo y tiempo finitos. Un algoritmo ha de tener las siguientes características: legible, correcto, modular, eficiente, estructurado, no ambiguo y de ser posible se ha de desarrollar en el menor tiempo posible. Entre los algoritmos que destacan por establecer las bases de la investigación de flujos en la teoría de grafos se pueden citar los siguientes:

Algoritmo de Kruskal (1956): Árbol de coste total mínimo-máximo

El objetivo del algoritmo de Kruskal es construir un árbol formado por arcos sucesivamente seleccionados de mínimo peso a partir de un grafo con pesos en los arcos. La aplicación típica de este problema es el diseño de redes telefónicas. Una empresa con diferentes oficinas, trata de trazar líneas de teléfono para conectarlas unas con otras. La compañía telefónica le ofrece esta interconexión, pero ofrece tarifas diferentes o costes por conectar cada par de oficinas. Cómo conectar entonces las oficinas al mínimo coste total. La formulación del MST (minimum spanning tree) también ha sido aplicada para hallar soluciones en diversas áreas (diseño de redes de transporte, diseño de redes de telecomunicaciones - TV por cable, sistemas distribuidos, interpretación de datos climatológicos, visión artificial - análisis de imágenes - extracción de rasgos de parentesco, análisis de clusters y búsqueda de superestructuras de quasar, plegamiento de proteínas, reconocimiento de células cancerosas, y otros).

Otra aplicación menos obvia es que el árbol de coste total mínimo puede ser usado como solución aproximada al problema del viajante de comercio (traveling salesman problem). La manera formal de definir este problema es encontrar la trayectoria más corta para visitar cada punto al menos una vez. Nótese que si se visitan todos los puntos exactamente una vez, lo que se tiene es un tipo especial de árbol. El algoritmo de Kruskal es uno de los más fáciles de entender y probablemente el mejor para resolver problemas a mano.

Algoritmo de Prim -1957): Árbol de coste total mínimo-máximo

El algoritmo de Prim encuentra un árbol de peso total mínimo conectando nodos o vértices con arcos de peso mínimo del grafo sin formar ciclos. Al igual que el algoritmo de Kruskal, el de Prim también ha sido aplicado para hallar soluciones en diversas áreas, sin embargo requiere más memoria que el algoritmo de Kruskal

Algoritmo de Bellman-Ford (1958): camino mínimo y máximo

Soluciona el problema de la ruta más corta o camino mínimo desde un nodo origen, de un modo más general que el Algoritmo de Dijkstra, ya que permite valores negativos en los arcos. El algoritmo devuelve un valor booleano si encuentra un circuito o lazo de peso negativo. En caso contrario calcula y devuelve el camino mínimo con su coste. El problema

de la ruta más larga puede ser transformado en el de ruta más corta cambiando el signo de los costes de los arcos.

Algoritmo de Dijkstra (1959): Ruta más corta – árbol mínimo – camino mínimo

El camino crítico estará formado por tareas críticas (nodos) cuya duración (coste del arco sucesor) determina la duración total de un proyecto. Si una tarea crítica se retrasa o su duración cambia durante la realización del proyecto, afectaría directamente a la duración total del proyecto y a su fecha de finalización. Encontrar el camino crítico de la planificación de un proyecto es lo mismo que encontrar el camino más largo desde el nodo inicial (tarea inicial) al nodo final (última tarea); esto es, la mínima cantidad de tiempo necesaria para finalizar un proyecto. El algoritmo de Dijkstra aunque fue diseñado para encontrar la ruta más corta se puede transformar fácilmente para encontrar la ruta más larga (camino crítico), cambiando simplemente su función objetivo. Del mismo modo, se encuentra el árbol máximo desde un nodo origen.

Algoritmo de Ford-Fulkerson (1962): Flujo máximo-mínimo corte

El problema de flujo máximo se enuncia como: ¿cuál es el costo al cual se puede transportar el material desde el nodo fuente al nodo pozo, sin violar las restricciones de capacidad? Este algoritmo se puede usar para resolver modelos de: transporte de mercancías (logística de aprovisionamiento y distribución), flujo de gases y líquidos por tuberías, componentes o piezas en líneas de montaje, corriente en redes eléctricas, paquetes de información en redes de comunicaciones, tráfico ferroviario, sistema de regadíos, etc.

Analogía las redes de flujo de transporte con los grafos.

Las redes de flujo de transporte pueden representarse y analizarse con grafos dependiendo del tipo de interacción espacial que se quiera modelar mediante diversas consideraciones los nodos pueden representar infraestructura, ya sea de manera puntual (aeropuertos, puertos, terminales de autobuses, estaciones, paradas de rutas de transporte, casetas de cobro, intersecciones de vialidades, semáforos, industrias, etcétera.) o áreas (estados, ciudades, colonias, distritos, áreas geoestadísticas básicas, regiones de cultivo, etc.). Esto puede hacerse con el uso de centroides o tomando como referencia lugares importantes o representativos de la zona (cabeceras municipales, oficinas de gobierno, monumentos, etc.). Los *nodos fuente* representan los centroides de los *orígenes* (zonas habitacionales, zonas industriales, zonas de producción de materias primas, etcétera) que producen o introducen en la red cierta cantidad de elementos (viajeros, trabajadores, productos, etcétera). Los *nodos pozo* representan los centroides de los *destinos* que consumen los elementos introducidos (zonas de negocio, estudio, recreación, puntos de venta, etcétera). Respecto a los arcos, pueden considerarse como los medios o conductos con capacidades de flujo diversas (como las vías de comunicación). De igual modo que en redes eléctricas (trabajos basados en la ley de Kirchhoff, 1845) o las leyes hidráulicas (sustentadas en el trabajo de Bernoulli, 1738), la suma de flujos entrantes a un nodo, debe ser igual a la suma de los salientes (principio de conservación de la energía, una de las leyes de Newton), excepto para el nodo fuente y el nodo pozo.

En la siguiente figura (2.12) se representa con un grafo un conjunto de interacciones humanas. En este grafo los arcos son bidireccionales y pueden tener diversas capacidades

en tipo y magnitud, además no existen nodos fuente o pozo pues todas las actividades se encuentran relacionadas entre si.

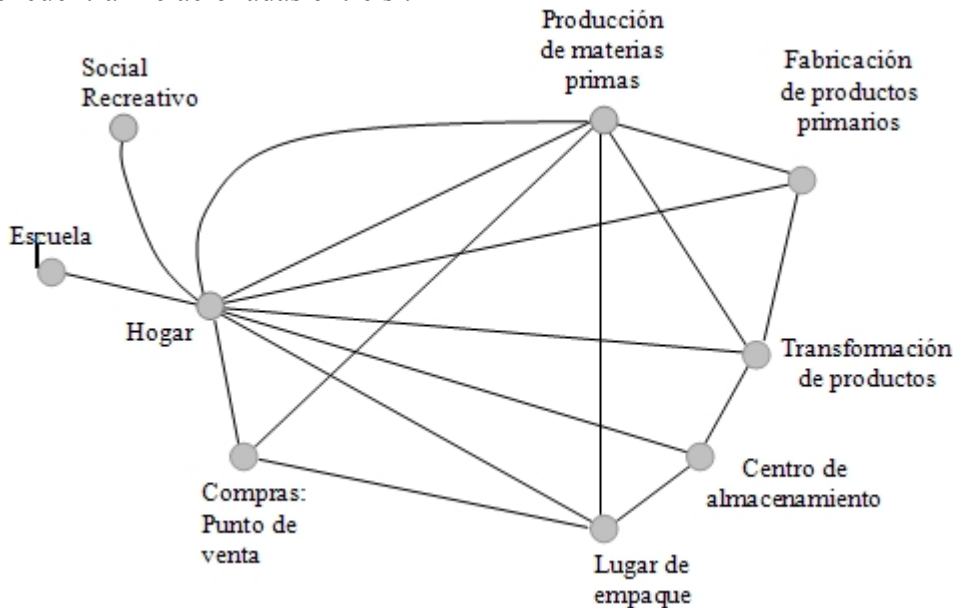


Figura 2.12 Grafo con la relación de algunas actividades humanas.

Fuente: elaboración propia.

Los atributos de los arcos según el análisis pueden ser: interacción, modo, orientación y magnitud, para el grafo de la figura anterior (2.12), algunos atributos pueden ser:

Interacción que representa el arco	Modo que representa el arco	Orientación del arco	Medidas de magnitud para los arcos (según el tipo de análisis)	Costo o impedancia de los arcos
Movilidad	A pie, vialidades (carreteras, calles), vías férreas, rutas aéreas y marítimas	Según la infraestructura y el medio físico: bidireccional o unidireccional	Accesibilidad y conectividad	Diversos índices
			Longitud	Kilómetros, metros, etc.
			Tiempo de recorrido	Días, horas, minutos, segundos
			Comodidad	Alta, media, baja (es subjetiva)
			Seguridad	Alta, media, baja
			Capacidad de carga	Toneladas
			Peaje	dólares, pesos, tiempo
			Combustible	rendimiento, costo monetario
Económica	Transporte (de bienes, pasajeros), flujo de capital, relaciones laborales.	Según la relación oferta-demanda, compra-venta, productor-consumidor	según la movilidad	Costos por relación de movilidad
			Comerciales	Parámetros económicos
			Cantidad	No. de unidades, No. de pasajeros
			Peso	Toneladas, kilogramos
			Dimensiones de producto	m ³
Información	Electrónico o físico	Según la difusión, la accesibilidad a los medios y las relaciones culturales	Ancho de banda	PG, TB, GB, kB, Bytes
			Cantidad	No. de unidades
			Calidad	Alta, media, baja (es subjetiva)
			Intensidad de la relación	Parámetros sociales

Tabla 2.1. Ejemplo de la estructura de los arcos para la modelación de redes de transporte mediante grafos. Fuente: elaboración propia.

Dependiendo del tipo de interacción que se analiza es como surgen las actividades (o nodos) generadoras (fuente) y atractoras (pozo).

Por ejemplo, un representante comercial tiene que visitar n ciudades conectadas entre sí por carreteras; su interés previsible será minimizar la distancia recorrida (o el tiempo, si se pueden prever congestionamientos). El grafo correspondiente tendrá como nodos las ciudades, como arcos las carreteras que proporcionan conectividad y la valuación será la distancia entre ellas. En la figura siguiente (2.13) se muestra a manera de ejemplo información cartográfica de la región centro de México adecuada como grafo utilizando un Sistema de Información Geográfica; las ciudades son representadas como nodos conectados por los arcos (vías de comunicación). Los arcos están clasificados por tipo de camino, además se indican las longitudes en kilómetros de los segmentos.



2.2 Modelos de interacción y de análisis espacial

Un modelo es una representación conceptual de un proceso o sistema normalmente desde un punto de vista matemático cuyo fin es analizar su naturaleza, desarrollar o comprobar hipótesis o supuestos y permitir una mejor comprensión del fenómeno real al cual el modelo representa. Un modelo surge de una serie de hipótesis planteadas, de manera que lo que se quiere representar esté suficientemente plasmado en la idealización pero que sea lo bastante sencillo como para poder ser manipulado y estudiado.

Enfoques en la modelación de las interacciones espaciales

El estudio de la interacción espacial puede llevarse a cabo mediante diversas técnicas y modelos que presentan formas funcionales y variables diversas que pueden ser endógenas o exógenas, dando lugar a grupos o “familias” de modelos divididos en dos grandes bloques (Chasco y García, 1997):

- Enfoque *Descriptivo-Determinista*. No busca explicar los motivos por los que se producen los flujos. Utiliza métodos cuantitativos y la observación empírica para determinar la demanda. Acerca del comportamiento de los consumidores utiliza hipótesis fundamentadas en supuestas normas de conducta respecto al tiempo de viaje, como es el caso del enfoque de los supuestos normativos (Christaller, Lösch, Thiessen) y otras veces aplica modelos gravitacionales comerciales basados en el modelo de Reilly. En la siguiente figura se esquematizan los principales modelos con este enfoque.

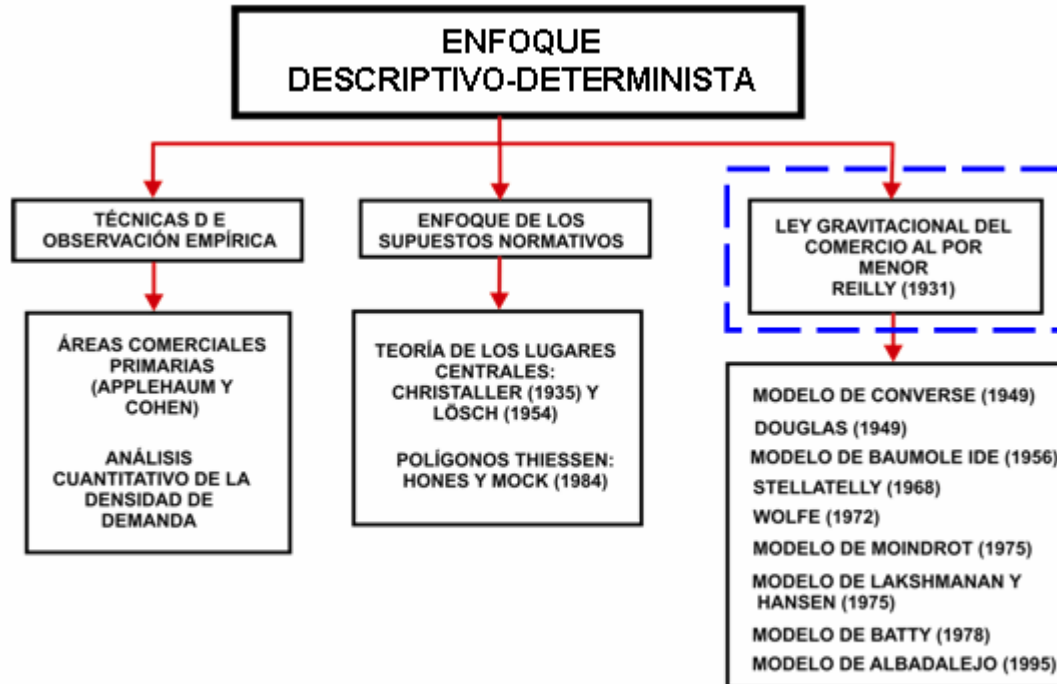


Figura 2.18 Enfoque determinista para modelar las interacciones espaciales. Fuente: Chasco y García, 1997.

- Enfoque *Explicativo-Estocástico*. Introducido por David Huff (1963). Utiliza modelos probabilísticos de elección que permiten la introducción y el estudio de nuevas variables influyentes en las interacciones. Esta gran familia de elementos se caracteriza por incluir elementos compensatorios de probabilidad, con una importante base estadístico-econométrica que explica los flujos en función de variables relativas al punto de origen y de destino, cuyos datos son extraídos a partir de las “preferencias” expresadas por una muestra de consumidores ya existentes. Vea la siguiente figura (2.19).

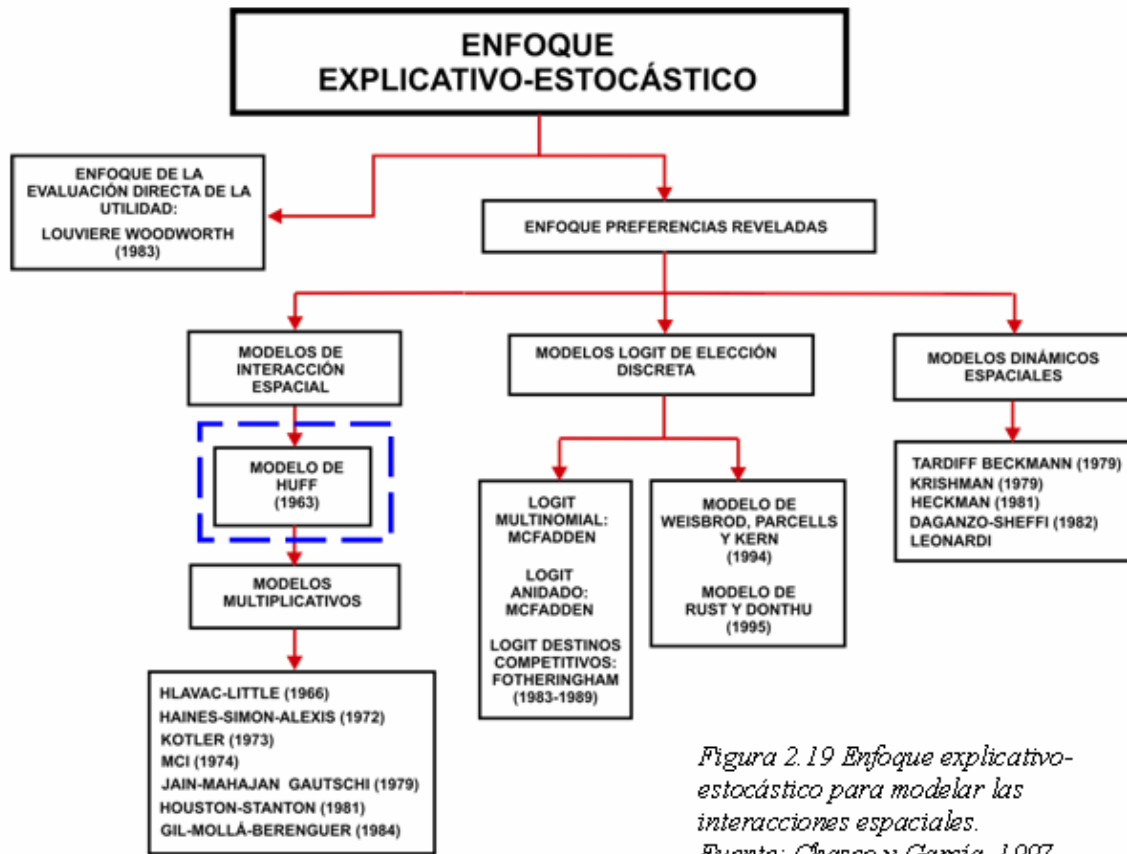


Figura 2.19 Enfoque explicativo-estocástico para modelar las interacciones espaciales.
Fuente: Chasco y García, 1997.

Las técnicas y modelos del enfoque *Descriptivo-Determinista* han sido universalmente utilizados en el estudio del fenómeno de interacción espacial. La mayoría de ellos son métodos relativamente sencillos, intuitivos y fáciles de llevar a cabo en cualquier circunstancia, por lo que, a pesar de su utilidad, frecuentemente se critican debido a su simplicidad y a la ausencia de una adecuada base teórica que fundamente sus postulados. El caso del enfoque de Supuestos Normativos y los Modelos Gravitacionales derivados del Modelo de Reilly, estamos conscientes de que se critica, tanto desde el campo de la psicología como de la economía donde existe el supuesto de una conducta económica racional donde el proceso de elección es determinista, ya que el individuo no está seguro de la alternativa a elegir, ni siquiera de si tomará la misma decisión bajo condiciones aparentemente idénticas. Sin embargo, tal conducta irracional de elección lleva a considerarla como un proceso probabilístico, surgiendo la línea de investigación de preferencias reveladas basada, en parte, en la teoría de la elección discreta.

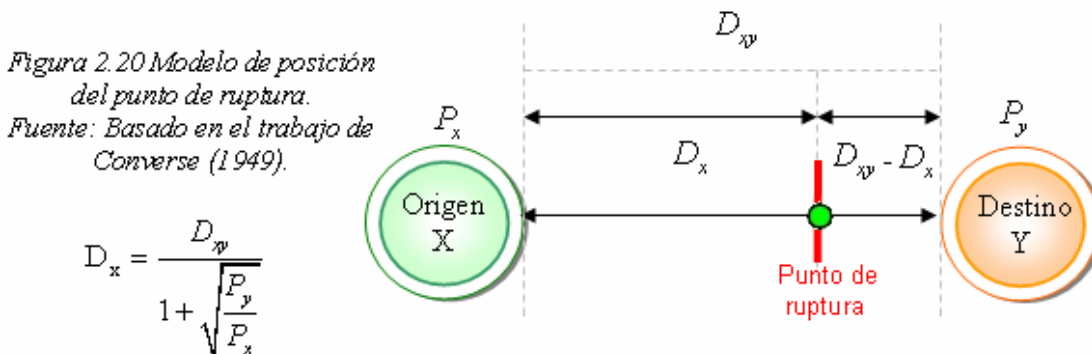
Antes de entrar de lleno a la explicación del modelo gravitacional de interacción, conviene exponer dos clases de modelos espaciales antecesores a éste: los modelos de *posición* con el enfoque descriptivo-determinista de los *flujos potenciales* y los modelos de *interacción espacial* con el enfoque de los *flujos efectivos* entre las localizaciones.

Modelos de posición

Describen la posición relativa de un lugar con respecto a otros y su objetivo es determinar *áreas de mercado* teóricas para un conjunto de lugares centrales, también se les conoce como *modelos de competencia*. Las áreas de mercado son divisiones territoriales que poseen un sentido económico del que carecen otras divisiones más comunes y utilizadas, como es el caso del municipio. El conocimiento y la actualización de las áreas de mercado de un territorio es un requisito indispensable para la resolución de todo problema de localización. El problema de la delimitación de mercados independientemente de las divisiones político-administrativas existentes lo planteó por primera vez el profesor Reilly de la Universidad de Texas, en 1931. Posteriormente han sido múltiples las ideas y las aportaciones a un campo de incuestionable interés para la planificación y el marketing: Christaller (1935), Applebaum (1961), Huff (1963), Jones y Mock (1984), Rust y Donthu (1995) entre otros.

Delimitación de fronteras

Converse (1949), basado en el trabajo de Reilly (1931), propuso el concepto de *punto de ruptura* mediante un modelo matemático, también conocido como *punto de indiferencia*, *frontera de competencia* o *punto de equiprobabilidad*. Dicho modelo asume que la frontera de mercado entre dos localizaciones es una función de su separación ponderada por el cociente de sus pesos respectivos que se expresa de la siguiente forma:



Donde:

D_x Punto de ruptura entre un par de localidades (x, y) en las unidades de separación espacial empleadas.

D_{xy} Separación espacial entre x e y . Puede expresarse en costo, tiempo o distancia.

P_x Peso de la localidad (x) de que se desea obtener la frontera de competencia. Expresado en unidades de masa (población, ventas, etc.).

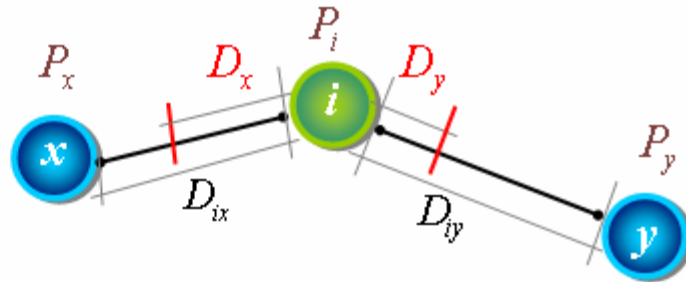
P_y Peso de localidad competitiva (y).

Como puede observarse en la figura anterior (2.20), el resultado del modelo es recíproco, es decir, el valor del punto de ruptura (frontera de competencia) entre x e y (D_x) es igual al valor de la frontera de competencia entre y, x ($D_{xy} - D_x$).

El siguiente esquema (figura 2.21) muestra el uso del modelo de posición de Converse para encontrar los puntos de ruptura de una localidad que compite contra otras dos. Posteriormente se desarrolla un ejemplo para entender mejor el funcionamiento del modelo.

Figura 2.21 Cálculo de puntos de ruptura múltiples.

Fuente: Basado en el trabajo de Converse (1949)



$$D_i = \frac{D_{ij}}{1 + \sqrt{\frac{P_j}{P_i}}}$$

$$D_x = \frac{D_{ix}}{1 + \sqrt{\frac{P_x}{P_i}}}$$

$$D_y = \frac{D_{iy}}{1 + \sqrt{\frac{P_y}{P_i}}}$$

Ejemplo de aplicación No. 2.

Identificación de las fronteras de competencia entre tres tiendas.

Existen tres tiendas (*i*, *j* y *k*), con igual disponibilidad y tipo de productos. Actualmente, la tienda *k* maneja un volumen de 50,000 compradores al año, la tienda *j* de 48,000 y la tienda *i* 35,000 clientes anuales. La tienda *i* se encuentra a 7 kilómetros de la tienda *k* y a 6 kilómetros de la tienda *j*. El objetivo del análisis es identificar cual de las dos tiendas (*j* y *k*) compite con mayor intensidad con *i*, y la distancia máxima teórica en que la tienda *i* no compite con las tiendas *j* y *k*. El diagrama conceptual del ejemplo es el mostrado en la figura 2.22:

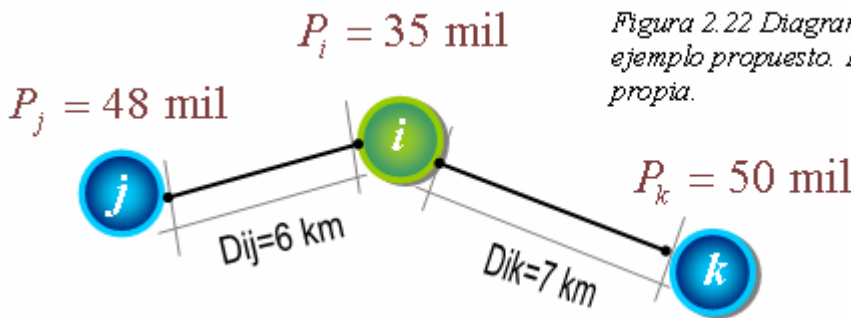


Figura 2.22 Diagrama conceptual del ejemplo propuesto. Fuente: elaboración propia.

Al analizar los datos del problema propuesto, como primera impresión se puede pensar que la tienda *k* ejercería mayor competencia sobre la tienda *i* debido a que concentra la mayor cantidad de clientes anuales. Sin embargo, otra perspectiva sobre el problema es que la tienda *j* tiene un volumen de ventas semejante en magnitud al de la tienda *k* y además se encuentra un kilómetro más cerca de la tienda *i*. En estos casos el modelo de competencia es útil, pues mediante una sustentación matemática, permite definir cual de las dos tiendas (*j* o *k*) compite con mayor intensidad contra la tienda *i*.

Utilizando el modelo de posición de Converse con los datos del problema, se obtienen los siguientes resultados:

$$D_j = \frac{6}{1 + \sqrt{\frac{48}{35}}} = 2.76 \text{ km.} \qquad D_k = \frac{7}{1 + \sqrt{\frac{50}{35}}} = 3.19 \text{ km.}$$

En la figura 2.23 se esquematizan los resultados. La frontera de mercado entre las tiendas i y j (D_j) se encuentra a una distancia de 2.76 km. desde i (y consecuentemente a una distancia de 3.24 km. desde $j \rightarrow D_{ij}-D_j$). De igual forma, la frontera de mercado entre las tiendas i y k (D_k) se encuentra a 3.19 km. desde i (y consecuentemente a una distancia de 3.81 km. desde $k \rightarrow D_{ik}-D_k$).

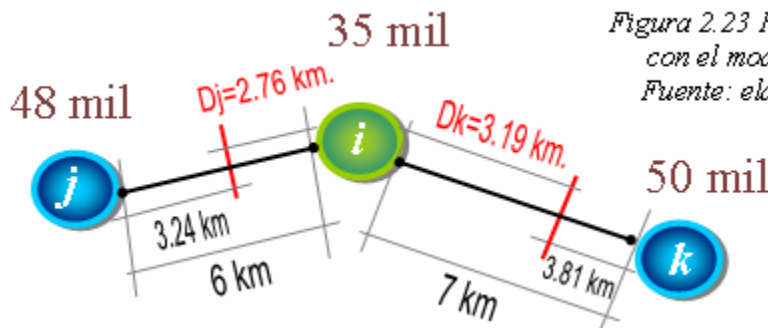


Figura 2.23 Resultados obtenidos con el modelo de Converse. Fuente: elaboración propia.

La conclusión del análisis es que la tienda j compite con mayor intensidad sobre i que la tienda k . Este tipo de información es muy valiosa para la planeación de estrategias de mercado y la localización de sitios.

El modelo de Converse también puede utilizarse para delimitar *áreas de influencia* de un centro dado frente a otros centros que se disputan sus compradores (vea la *teoría de los lugares centrales*). Esto se logra al generar un polígono mediante la unión de diversos puntos de ruptura (VVAA, 1988). A continuación se muestra un ejemplo práctico sobre este uso:

Ejemplo de aplicación No. 3.

Delimitación del área de influencia de mercado del Distrito Federal frente a 8 de sus localidades conurbadas más importantes mediante el modelo de competencia.

Se eligieron centroides para ocho localidades conurbadas al Distrito Federal que se disputan a los compradores del D.F.: Tula, Pachuca, Tulancingo, Apizaco, Puebla, Cuautla, Cuernavaca y Toluca (fig. 2.24). A través de la obtención de los puntos de ruptura con respecto a estas localidades se procederá a delimitar el área de influencia del D.F. La modelación se llevó a cabo en un Sistema de Información Geográfica. Esto permitió obtener los datos requeridos por el modelo (tabla 2.2), generar y representar los resultados en forma precisa. Cabe mencionar que el parámetro de separación

espacial empleado para este ejemplo fue la *distancia euclidiana*¹ y para los pesos de las localidades se consideró la magnitud de población. Es posible aumentar la exactitud de la modelación al considerar las distancias sobre la red carretera y la población económicamente activa como los pesos de las localidades. Pese a esto, el resultado obtenido muestra claramente el comportamiento de este sistema urbano.

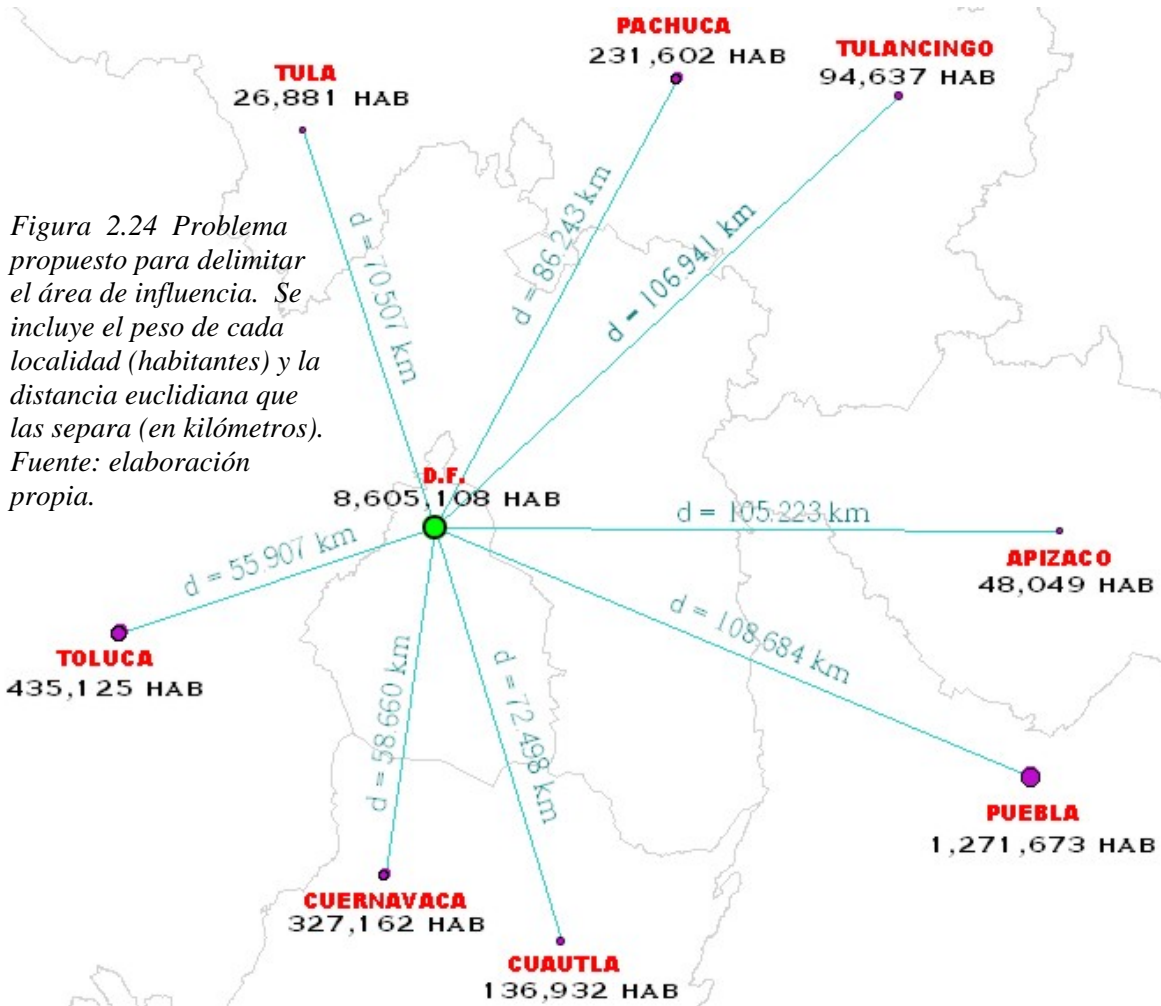


Figura 2.24 Problema propuesto para delimitar el área de influencia. Se incluye el peso de cada localidad (habitantes) y la distancia euclidiana que las separa (en kilómetros). Fuente: elaboración propia.

ID	Ciudad	Habitantes	Distancia al D.F. (en Km.)
0	D. F.	8,605,108	0
1	Apizaco	48,049	105.223
2	Puebla	1,271,673	108.684
3	Cuernavaca	327,162	58.660
4	Cuautla	136,932	72.498
5	Toluca	435,125	55.907
6	Tulancingo	94,637	106.941
7	Pachuca	231,602	86.241
8	Tula	26,881	70.507

Tabla 2.2 Información requerida para la modelación del problema propuesto. Fuente: elaboración propia.

¹ Es la distancia en línea recta entre dos puntos. También se le denomina *distancia aérea* o *distancia ideal*. En términos de ingeniería de transporte, se les llama *líneas origen-destino*. En el ámbito de los SIG se les denomina redes de arañas (*spiderweb diagrams*).

Al introducir los datos necesarios, se generó el modelo en la hoja de cálculo del SIG obteniendo los siguientes resultados:

ID	Origen (X)	Px (Habitantes)	Destino (Y)	Py (Habitantes)	Dxy (en Km.)	Dx	Dxy-Dx
0	D.F.	8,605,108	D.F.	8,605,108	0	-	-
1	D.F.	8,605,108	Apizaco	48,049	105.223	97.882	7.341
2	D.F.	8,605,108	Puebla	1,271,673	108.684	78.529	30.155
3	D.F.	8,605,108	Cuernavaca	327,162	58.66	49.088	9.572
4	D.F.	8,605,108	Cuautla	136,932	72.498	64.385	8.113
5	D.F.	8,605,108	Toluca	435,125	55.907	45.638	10.269
6	D.F.	8,605,108	Tulancingo	94,637	106.941	96.779	10.162
7	D.F.	8,605,108	Pachuca	231,602	86.241	74.092	12.149
8	D.F.	8,605,108	Tula	26,881	70.507	66.768	3.739

Tabla 2.3 Resultados obtenidos por la modelación. Fuente: elaboración propia.

Con el fin de aclarar el procedimiento, se incluye la sustitución de la fórmula de Converse para cada par origen – destino.

$$D_1 = \frac{105.223}{1 + \sqrt{\frac{48,049}{8,605,108}}} = 97.882 \text{ km}$$

$$D_3 = \frac{58.660}{1 + \sqrt{\frac{327,162}{8,605,108}}} = 49.088 \text{ km}$$

$$D_2 = \frac{108.684}{1 + \sqrt{\frac{1,271,673}{8,605,108}}} = 78.529 \text{ km}$$

$$D_4 = \frac{72.498}{1 + \sqrt{\frac{136,932}{8,605,108}}} = 64.385 \text{ km}$$

$$D_5 = \frac{55.907}{1 + \sqrt{\frac{435,125}{8,605,108}}} = 45.638 \text{ km}$$

$$D_7 = \frac{86.241}{1 + \sqrt{\frac{231,602}{8,605,108}}} = 74.092 \text{ km}$$

$$D_6 = \frac{106.941}{1 + \sqrt{\frac{94,637}{8,605,108}}} = 96.779 \text{ km}$$

$$D_8 = \frac{70.507}{1 + \sqrt{\frac{26,881}{8,605,108}}} = 66.768 \text{ km}$$

Al unir los puntos de ruptura en el SIG, se genera una envolvente poligonal donde los habitantes de los núcleos poblacionales situados dentro del área señalada, son absorbidos por el mercado del Distrito Federal. La representación del resultado se muestra en las figuras 2.25 y 2.26.

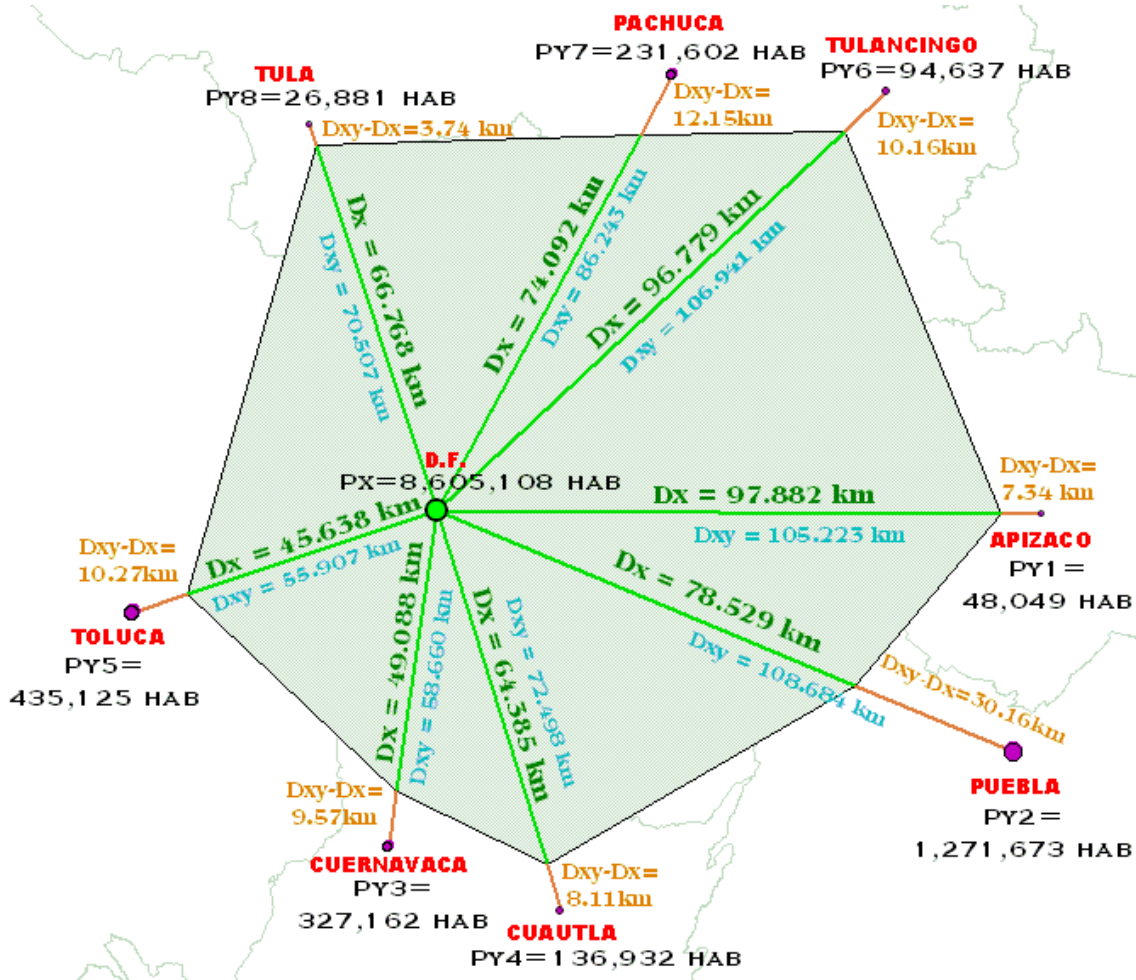


Figura 2.25 Área de influencia según el modelo de Converse para el Distrito Federal frente a 8 de sus localidades conurbadas más importantes.
Fuente: elaboración propia.

El Distrito Federal tiene un valor social, simbólico y económico hacia el que convergen flujos (de personas, de energía, de materiales o de información) salidos de la periferia hacia el centro y que lo diferencia de otros centros (Toluca, Pachuca, Puebla, Cuernavaca, etcétera) provocando una polarización del sistema espacial. Es posible deducir que saca provecho de la población periférica contenida dentro del polígono, que se caracterizan por deficiencias que las mantienen en su posición de dominadas, además, la dinámica del sistema (existencia de intercambio y desigualdad) implica que si ciertas periferias llegaran a volverse ángulos muertos serán abandonadas y otras, sin embargo, pueden beneficiarse con su situación ya sea por su ventaja en tamaño o la posición de contacto con el exterior del sistema espacial. Los centros que tienen su punto de ruptura cercano al equilibrio (Puebla y Toluca) compiten (o interactúan) con mayor igualdad con el Distrito Federal a diferencia de que aquellos que prácticamente son absorbidos (como el caso de Tula o Apizaco).

Incluyendo las áreas urbanas en la representación del resultado (figura 2.26), se aprecia claramente el alcance y utilidad del modelo.

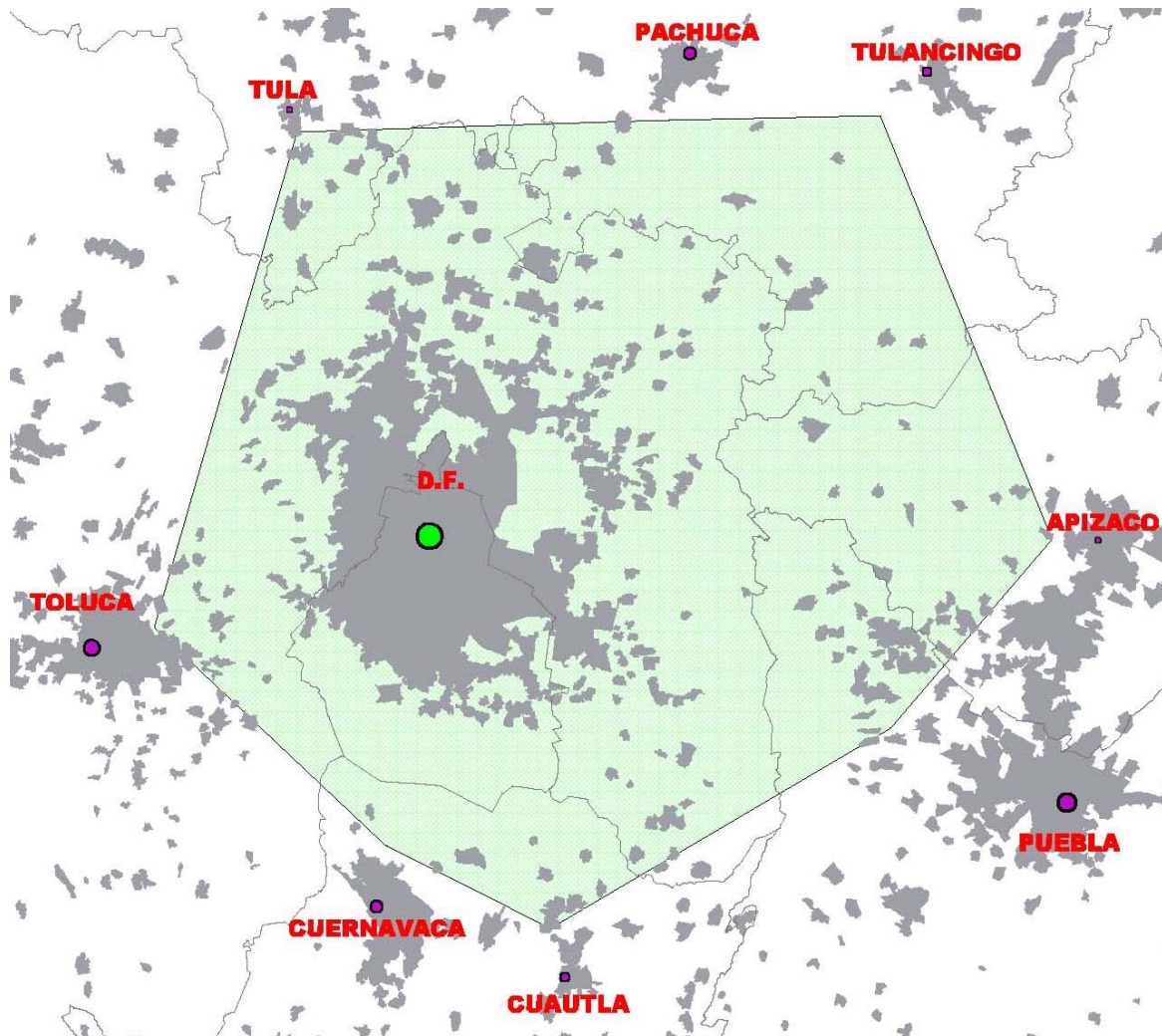


Fig. 2.26 Áreas urbanas de las localidades en estudio (gris) y área de influencia de mercado según el modelo de Converse para el D.F (verde). Fuente: elaboración propia.

Otras consideraciones:

El trabajo de Converse proporciona una base sistemática para estimar las áreas de mercado, y de hecho ha sido aplicado en numerosos estudios prácticos y su utilidad es innegable, pero hay que tener en cuenta:

1. La fórmula del punto de ruptura es incapaz de proporcionar estimaciones graduales: la frontera es siempre rígida, aspecto que no ocurre en la realidad.
2. Cuando el punto de ruptura es utilizado para delimitar áreas de mercado entre cada uno de los puntos de una zona, se producen solapamientos que oscurecen la interpretación de la fórmula.
3. Finalmente, la fórmula no debe ser interpretadas de la misma forma para cualquier tipo de problema. Es necesaria la utilización de un exponente, que debe variar dependiendo del tipo de interacción considerada. Como

resultado, una ciudad puede tener diferentes áreas de mercado que se corresponden con diferentes clases de bienes o productos.

Comparación de los modelos de competencia con otros métodos de análisis espacial.

Existen otras metodologías para obtener áreas de influencia, como los polígonos de Thiessen (1911), que evalúan la proximidad con el cálculo de las distancias medias euclidianas entre dos (o más) puntos. El resultado de este algoritmo se aprecia en la figura 2.27. Este método surgió para aplicaciones hidrológicas, pues hace un reparto uniforme del territorio.

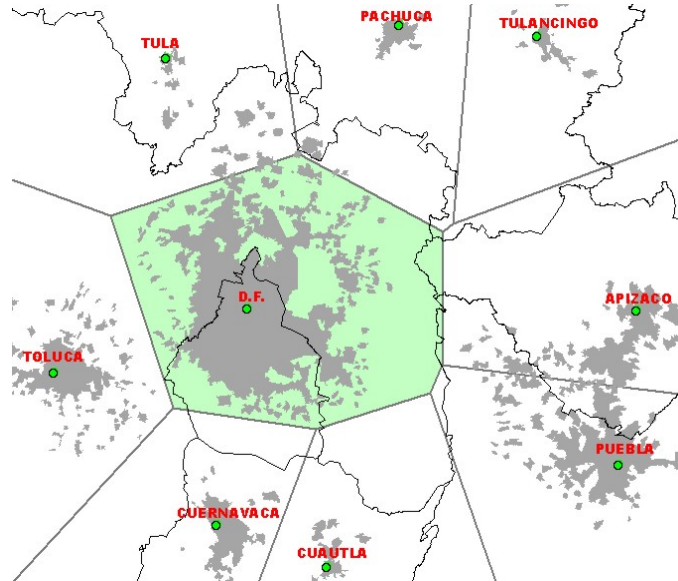


Figura 2.27 Área de influencia del ejemplo anterior utilizando polígonos de Thiessen.
Fuente: elaboración propia.

El área de influencia obtenida para un juego de puntos utilizando el modelo de punto de ruptura, permite considerar la separación espacial *ponderada* por algún otro atributo (como la población o el volumen de ventas), cuestión no considerada en la modelación con Thiessen, además Converse permite trabajar con la distancia sobre una red, y la interpretación de los resultados permiten generar una idea de la magnitud de las interacciones. Los resultados entre Converse y Thiessen serían similares solamente si dos localidades poseen la misma importancia (o peso) y se considera la distancia euclidiana como medida de la separación.

Modelos de interacción espacial

Los *modelos de interacción espacial* estudian los flujos efectivos que se establecen entre las unidades territoriales (Huff, 1963). El supuesto básico de estos modelos señala que las interacciones espaciales están en función de los atributos de los lugares de origen-destino y de la *resistencia* que la distancia produce entre ellos. La formulación general para estos modelos se muestra a continuación en la figura 2.28:

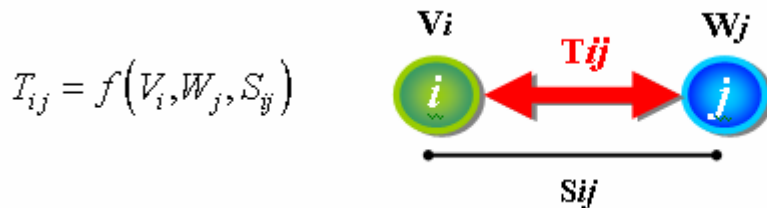


Figura 2.28 Formulación general de los modelos de interacción.

Fuente: Huff, 1963

Donde:

T_{ij} = Interacción entre la localidad i (origen) y la localidad j (destino). Las unidades de medida son variadas dependiendo de la estructura matemática del modelo y pueden involucrar personas, toneladas de carga, volumen de tráfico, probabilidad de interacción, etc. Puede implicar también un período de tiempo como las interacciones por hora, día, mes o año.

V_i = Atributos de masa de la localidad de origen i . Las variables frecuentemente usadas para expresar estos atributos son socioeconómicas por naturaleza, como población, número de empleos disponibles, generación industrial o producto interno bruto.

W_j = Atributos de masa de la localidad de destino j . Utiliza variables socioeconómicas similares que el atributo previo.

S_{ij} = Atributos de separación espacial entre la localidad de origen i y la localidad de destino j . También conocida como fricción de transporte. Las variables frecuentemente utilizadas para expresar estos atributos son distancia, costo de transportación o tiempo de viaje.

VARIABLES DE MASA.

Entre la gran variedad de aplicaciones de los modelos de interacción espacial, la variable más frecuente utilizada para expresar la *masa* es la *población*. La razón fundamental de esta analogía se debe a la facilidad con que se puede obtener a partir de los datos estadísticos existentes. Además, la masa así definida parece ser perfectamente satisfactoria en lo que se refiere a los estudios de los desplazamientos laborales o de las migraciones. Las variables de masa origen - destino (V y W) *deben ser pares* para expresar la *complementariedad*¹ en el mejor modo posible. Por ejemplo, al medir los flujos de viajes relacionados con el trabajo entre diferentes localidades, probablemente se consideraría una variable como la población en edad productiva para V y el total de empleos disponibles para W .

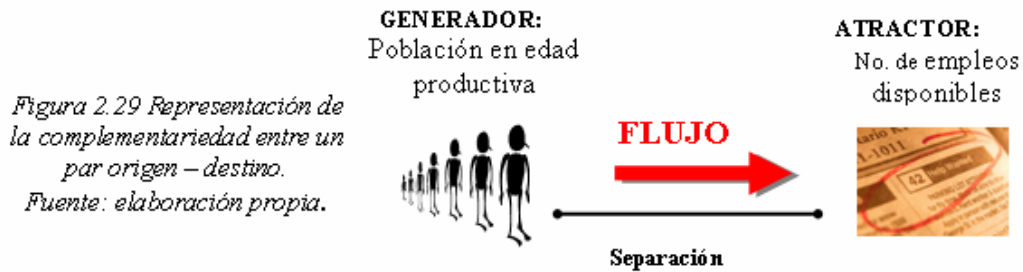


Figura 2.29 Representación de la complementariedad entre un par origen - destino.
Fuente: elaboración propia.

Otras medidas de masa para la modelación pueden ser los gastos de inversión, el número de familias, el número de automóviles registrados, el número de camas en los hospitales, el número de tractores, la magnitud de la producción de las mercancías, etc.(Domansky, 1977). Algunos autores estiman que la medida de masa que puede utilizarse para evaluar los flujos es la cantidad de excedentes en las áreas de origen y la

¹ Vea en el capítulo 1 el apartado sobre las condiciones para las interacciones espaciales.

de insuficiencias sobre el área de destino, esto debido a que los flujos se originan por la existencia de regiones caracterizadas por la excedencia de algunos bienes y de regiones que registran la insuficiencia de los mismos bienes. En la práctica, la definición de la medida de masa debe deducirse cada vez, según el tipo de problema que constituya el objeto del estudio, además generalmente es limitada por el carácter de los datos disponibles.

Uso de pesos para jerarquizar las variables.



Existen muchas variables que tienen una importancia fundamental para la definición de la magnitud de la interacción y que no pueden ser introducidas en los modelos. Sin embargo, se puede mitigar este punto débil si se introducen *coeficientes de ponderación*² (ω) en las variables de la masa y de distancia. Los coeficientes de ponderación son constantes (o variables) específicas para la población de cada núcleo o tipos de núcleo o bien de áreas, respecto al tipo de influencia que ejercen y adoptan la forma de números relativos, tales como los índices o números proporcionales (Chojnicki, 1966). La función de la variable de la masa adquiere en los modelos de interacción este aspecto:

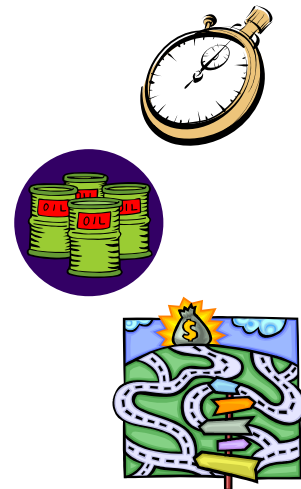
$$f(M_i, M_j) = (\omega_i M_i) \cdot (\omega_j M_j)$$

Los coeficientes de ponderación de las masas suelen escogerse empíricamente, con ayuda del método de pruebas y errores. Sin embargo, conviene subrayar que hace falta un análisis más próximo de la relación existente entre la elección de los coeficientes correspondientes y el tipo concreto de la interacción (Chojnicki, 1966).

Medidas de separación en los modelos de interacción espacial.

La elección de la medida de separación plantea problemas similares a los de las variables de masa. Parece que la solución más conveniente es expresarla mediante una función que integre los *costos de transportación* (la llamada distancia económica). Este enfoque, a primera vista puede parecer cómodo cuando se trata con distintos modos de transporte, pero en algunas ocasiones puede resultar complicado, ya que en los costos no sólo influye el importe de la tarifa o flete, el costo de los combustibles (o energía), las cuotas por peaje, la depreciación de los vehículos, etcétera, sino también otros factores subjetivos como el confort, preferencias de los usuarios, disponibilidad a viajar. Por si fuera poco, todos estos factores son distintos para los viajes de pasajeros y para el transporte de mercancías; y dentro del marco de estos dos grupos también están diferenciados.

Para simplificar la modelación de las interacciones, el coste de transporte con frecuencia es reemplazado por el *tiempo de superación del espacio*,



² Para mayor referencia, vea el apartado sobre jerarquía de los centros en el capítulo 1.

que tiene gran *valor* para los actores (especialmente en los estudios de los desplazamientos laborales), aunque también se utilizan las *medidas métricas de distancia*. Entre las diversas medidas de distancia que generalmente se aplican, destacan por su enfoque diverso: el consumo de combustible (o energía) por el transporte, el número de puntos de trasbordo o paradas y el número de las oportunidades mediadoras.

Uso de funciones y factores de distribución para modelar la separación espacial.

En los primeros estudios se observó que el exponente “n” en la función de resistencia “ S_{ij} ” no es el mismo en todas las áreas. Incluso dentro de cada una de estas áreas el exponente no es el mismo para todos los tipos de interacciones. Esta fue una de las razones que condujeron a clasificar las interacciones en función de sus objetivos y el estado de la red.

También queda claro que la formulación empírica de la función de resistencia, usando simplemente el inverso de la distancia (o del tiempo) elevada a algún exponente, no es suficiente. Es común calibrar la función de impedancia directamente con datos obtenidos en campo; de este modo se le convierte en una *función de distribución* y los valores de esta función en *índices de distribución* o *factores de fricción*.

Discontinuidades y barreras en el estudio de las interacciones espaciales.

En los modelos de interacción espacial se parte del supuesto de que la variable de la separación espacial es *continua*, sin embargo en la práctica esta variable puede registrar cambios bruscos. Para definir restos fenómenos se utilizan invariablemente los términos discontinuidad o barrera, sin embargo tienen significados diferentes. Una discontinuidad es lo que separa a dos conjuntos espaciales vecinos y diferentes.

Las discontinuidades pueden ser descritas según sus formas elementales:

- En un nivel de observación dado, se distingue la discontinuidad lineal, en la cual el límite se reduce a un umbral único, como sería el caso de la barrera natural producida por un río.
- La discontinuidad areal (de área) es la zona de transición comprendida entre dos umbrales: uno de aparición y uno de extinción. Vea los conceptos de umbral y alcance en la teoría de lugares centrales de Christaller en el capítulo 1.

Por ejemplo, en el caso de los límites municipales se habla de un tipo de discontinuidad *administrativa*, pues existe una apropiación de los espacios y un reconocimiento jurídico de los límites territoriales

Se habla de barrera cuando la discontinuidad está asociada a una perturbación notable de los flujos. Efectos similares ocurren con las llamadas barreras lingüísticas (MacKay, 1958) para el estudio de los flujos telefónicos.

Algunas barreras pueden ser:

- Físicas, como el caso de límites hidrológicos y variaciones topográficas.
- Estructurales, producidas por la desarticulación del territorio, como sería la ausencia de infraestructura y servicios de transporte.
- Económicas, generadas por los tratados de libre comercio o restricciones de mercado.

- Sociales producidas por la diversidad de cultura e idioma.
- Ambientales, principalmente encaminadas a la protección de la ecología y que buscan disminuir el impacto de las actividades humanas, como el caso de la presencia de reservas ecológicas que impiden la localización de asentamientos y empresas.

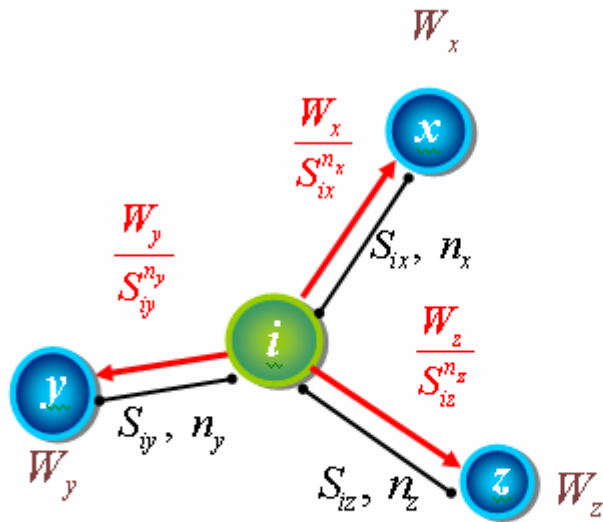
Las discontinuidades y barreras que se encuentran espacialmente organizadas resisten mejor en el transcurso del tiempo, pues se ha observado que surgen otras interacciones producto de su existencia y el progreso del sistema. Por ejemplo, en ausencia de barreras las diferencias de vecindad tenderán a autorregularse, pues la evolución del sistema provocará situaciones más ventajosas para superarlas. Recíprocamente, la presencia de discontinuidades puede conducir a evoluciones divergentes de los espacios, incluso a formaciones de nuevos sistemas autónomos.

Modelo de potencial de interacción.

A partir de la formulación general de los modelos de interacción (Figura 2.28), pueden construirse 2 clases de modelos: de *potencial* y los de tipo *gravitacional*.

El potencial de interacción (Huff, 1964) es un modelo *uno a muchos*, pues evalúa dentro de un sistema la capacidad particular que tiene una localización de interactuar con otras. En este tipo de modelos éste parámetro se comporta en forma de gradiente³, ya que propone que las oportunidades de interacción de una localización son proporcionales a la posición espacial de éste en el sistema.

En la siguiente figura (2.30) se esquematiza el potencial que tiene la localidad *i* (*T_i*) de interactuar con cada una de las localidades *x*, *y*, *z*. Los resultados que se obtienen con este modelo *no son recíprocos*, es decir, únicamente calcula las interacciones potenciales de la localidad *i*.



$$T_i = \sum_j \frac{W_j}{S_{ij}^{n_j}} \Rightarrow$$

$$T_i = \frac{W_x}{S_{ix}^{n_x}} + \frac{W_y}{S_{iy}^{n_y}} + \frac{W_z}{S_{iz}^{n_z}}$$

Figura 2.30
Formulación general del modelo de potencial.

Fuente: Huff, 1964.

Donde:

W_j = Masa de la localidad que interacciona con la localidad *i*.

³ Vea el apartado que habla sobre los gradientes al inicio de este capítulo.

S_{ij} = Separación espacial entre la localidad i (de la que se desea obtener el potencial) y la localidad j (que interacciona con la localidad i).
 n_j = Coeficiente de separación (fricción) espacial entre i y j .

Ejemplo de aplicación No. 4.

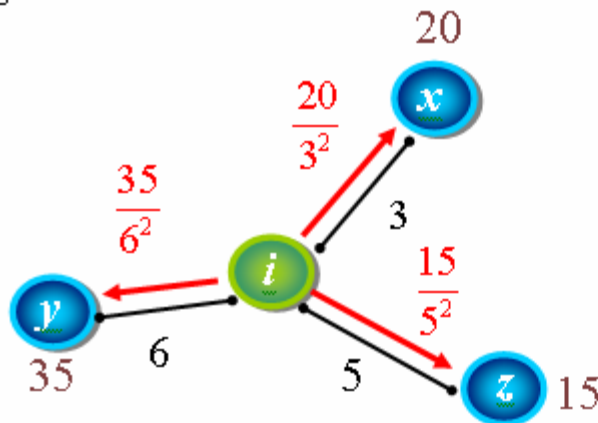
Obtención del potencial de interacción desde una localidad hacia otras 3.

Se considera que la fricción ocasionada por la distancia es igual a 2 y se cuenta con la siguiente estructura de datos base:

	Localidad x	Localidad y	Localidad z
W (peso en miles de habitantes)	20	35	15
S (distancia desde i en km.)	3	6	5

Tabla 2.4 Estructura de los datos para modelar el potencial de interacción
 Fuente: elaboración propia.

La forma de obtener el índice de potencial de interacción de la localidad i es la siguiente:



$$T_i = \frac{W_x}{S_{ix}^{n_x}} + \frac{W_y}{S_{iy}^{n_y}} + \frac{W_z}{S_{iz}^{n_z}}$$

$$T_i = \frac{20}{3^2} + \frac{15}{5^2} + \frac{35}{6^2}$$

$$T_i = 2.22 + 0.6 + 0.972$$

$$T_i = 3.792$$

Figura 2.31 Modelación del potencial de interacción.
 Fuente: elaboración propia.

La información obtenida con el modelo puede expresarse en porcentajes:

(Viajeros hacia x + Viajeros hacia y + Viajeros hacia z) 100%
 Viajeros hacia x? %
 3.79 100%
 2.22 58.58%

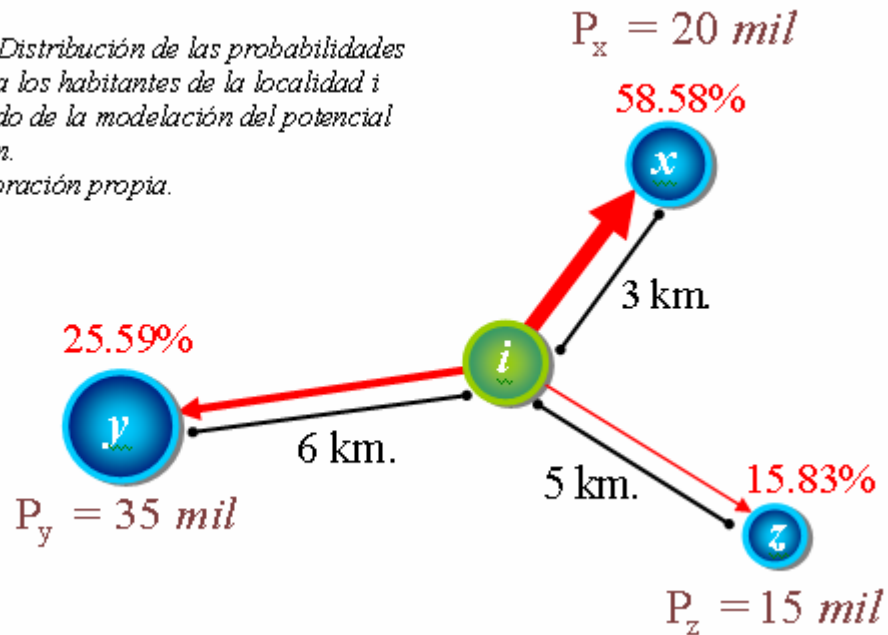
(Viajeros hacia x + Viajeros hacia y + Viajeros hacia z)	100%
Viajeros hacia y	? %
3.79	100%
0.97	25.59%

(Viajeros hacia x + Viajeros hacia y + Viajeros hacia z)	100%
Viajeros hacia z	? %
3.79	100%
0.60	15.83%

Esto significa que el 58.58% de los posibles viajeros que viven en *i* lo harán hacia *x*, el 25.59% hacia *y*, y sólo el 15.83% lo harán hacia *z*. A continuación en la figura 2.32 se representa este resultado diferenciando el grosor de la línea.

Figura 2.32 Distribución de las probabilidades de viajar para los habitantes de la localidad *i* como resultado de la modelación del potencial de interacción.

Fuente: elaboración propia.



Otro punto a favor de esta clase de modelos es su versatilidad dado que permiten identificar rápidamente la jerarquía de las interacciones en relaciones uno a muchos. Por ejemplo, si en lugar de trabajar con localidades se utilizaran centros comerciales con variables como ventas anuales y tiempo de conducción en automóvil es posible generar con el modelo información fundamental en el estudio de los consumidores potenciales.

3

EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS A TRAVÉS DEL TRANSPORTE

Objetivo: Exponer los antecedentes y explicar el uso del modelo gravitacional para medir interacciones aplicadas a la solución de problemas de transporte.

3.1 Utilidad del modelo gravitacional en estudios de transporte

Antecedentes

A la fuerza de atracción mutua que experimentan dos objetos con masa se le llama gravedad. El modelo gravitacional es un modelo análogo de la ley de la gravitación universal, introducida por Isaac Newton en 1687 en su obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Newton postuló que la fuerza gravitacional que actúa entre dos cuerpos en el espacio es directamente proporcional a la masa de estos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. En la siguiente figura (3.1) se muestra la ecuación original de Newton junto con un esquema.

$$\vec{F} = G \frac{m \cdot M}{r^2}$$

Donde:

G = Constante de gravitación que determina la intensidad de la fuerza de gravedad ejercida por los cuerpos

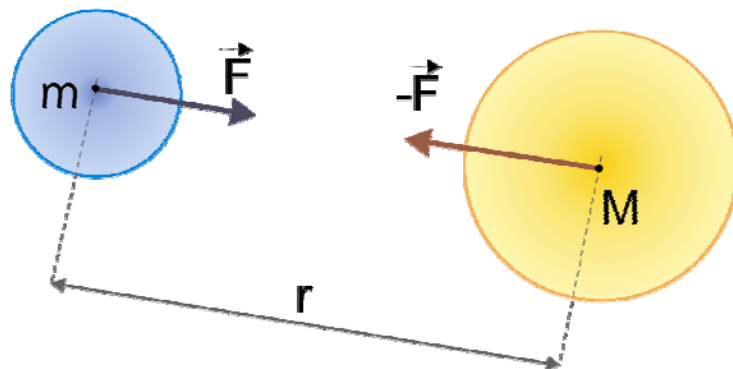


Figura 3.1 Fórmula de la gravitación universal y esquema de la fuerza de gravedad entre dos masas M y m , separadas a una distancia r .

Fuente: <http://es.wikipedia.org>

Las primeras aplicaciones del modelo gravitacional en el análisis espacial, pueden rastrearse a fines del siglo XIX con la observación de las interacciones humanas, en especial los fenómenos migratorios, lo que condujo muy pronto a diferentes investigadores

(Ravenstein-1885, Carey-1858 y Young-1924) a poner en evidencia leyes empíricas, que fueron comparadas por analogía con las leyes de la gravitación universal. Los modelos gravitacionales por ello son considerados como los precursores de formalizaciones teóricas más generales de los flujos.

Un esfuerzo clave en este campo está asociado con Reilly (1929), quien expresó la idea matemáticamente en su estudio sobre la delimitación de las zonas de influencia comerciales en las áreas de comercio al menudeo en localidades de tamaño moderado. Reilly llegó a la conclusión de que el comportamiento es una analogía de la ley de gravitación universal: “Bajo condiciones normales, dos ciudades realizan comercio de bienes al menudeo con una ciudad (o pueblo) de características promedio y de tamaño pequeño, en directa proporción con el poder que ejerce la población de las dos ciudades grandes y en inversa proporción con el efecto que ejerce la distancia desde estas ciudades grandes hacia la ciudad pequeña”.

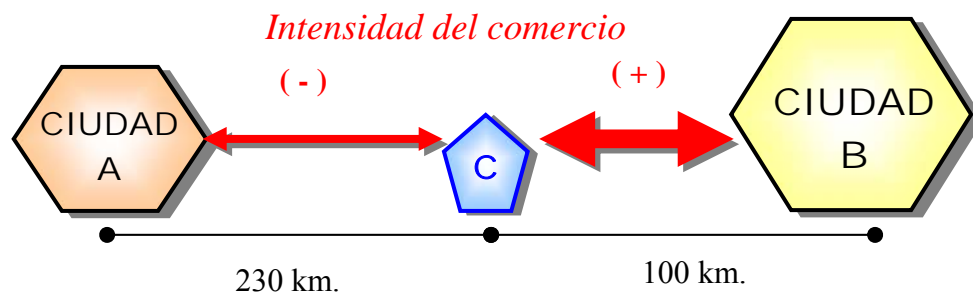


Figura 3.2 Representación gráfica de la idea de Reilly sobre la interacción de las áreas de comercio entre localidades. Fuente: elaboración propia basada en el trabajo de Reilly, 1929.

Generalmente se utiliza la *distancia funcional* entre las ciudades en lugar de la distancia euclidiana. La distancia funcional puede ser la distancia a conducir, el tiempo de vuelo entre ciudades u otras medidas de separación espacial.

Otros ejemplos del uso de la ecuación gravitacional aplicada al estudio de las interacciones poblacionales están disponibles en trabajos de científicos sociales como Zipf (1949), Cavanaugh (1950) y Dodd (1950). La idea general de estos autores se refiere a que el movimiento de personas, bienes o información entre dos ciudades depende del tamaño de las mismas debido a que los lugares con mayor tamaño atraen gente, ideas y servicios en mayor proporción que los lugares pequeños, además identifican que los lugares que se encuentran más cercanos tienen una atracción mayor que los que se encuentran distanciados. Específicamente esta forma del modelo gravitacional enuncia: el movimiento entre dos ciudades es directamente proporcional al producto de sus poblaciones, e inversamente proporcional a su distancia”. La representación matemática es:

$$\text{Movimiento entre A y B} = K \cdot \frac{\text{Poblacion de A} \cdot \text{Poblacion de B}}{(\text{Distancia funcional entre A y B})^\beta}$$

En la ecuación anterior, K y β son constantes de calibración, cuyos valores pueden fijarse según cada caso, cuestión que posteriormente se explicará con profundidad. El producto de las masas ($P_A * P_B$) representa una probabilidad condicional para que el elemento A interactúe (o de intercambie su localización) con un elemento B .

En la siguiente figura (3.3) se esquematizan las variables utilizadas en esta versión del modelo:

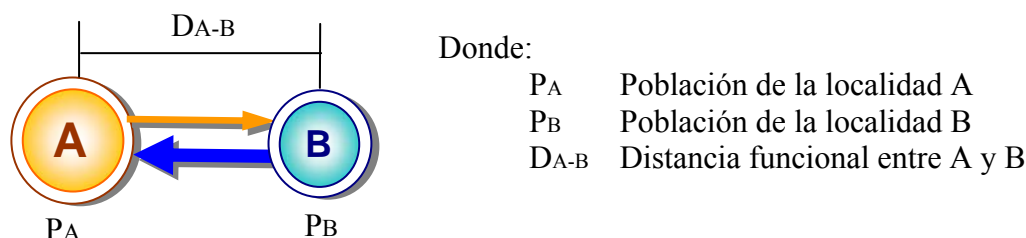


Figura 3.3 Esquema simplificadorio de las variables utilizadas en el modelo de Reilly.
Fuente: elaboración propia basada en el trabajo de Reilly, 1929

En los estudios donde se busca medir la atracción y generación en términos de población (P_i) y empleo (E_j) en las zonas respectivas la función de resistencia se supone ligada a una función inversa de la distancia (d^β), he ahí la analogía con ley de la gravitación universal de Newton. La ecuación para este caso se escribe como esta expresada a la derecha:

$$t_{ij} = k \cdot \frac{P_i \cdot E_j}{d^\beta}$$

El modelo gravitacional también puede usarse para comparar las interacciones entre continentes, países, estados, municipios o incluso entre colonias dentro de la misma ciudad. Otros ejemplos de aplicaciones del modelo gravitacional son la predicción de flujos migratorios interregionales o interurbanos de poblaciones a mediano plazo, jerarquización de la interacción entre localidades según el número de llamadas telefónicas y análisis de flujos de mercancías e información.

Expresiones más complejas del modelo gravitacional han servido de apoyo para la previsión de necesidades en infraestructuras de transporte al anticipar flujos de tránsito como los desplazamientos domicilio-trabajo en una cuenca de empleo urbano a partir de la repartición de las zonas de residencia y de empleo.

Las primeras aplicaciones del modelo gravitacional en la planeación del transporte fueron utilizadas en los estudios de viajes interurbanos. Carroll (1954) utilizó la fórmula como ayuda para determinar el área sobre la cual los centros urbanos tienen influencia. Utilizando dos tipos de flujos, los telefónicos y los viajes interurbanos para 21 ciudades en Michigan (EU), Carroll concluyó que el exponente de distancia debería ser de 2.8 en lugar del tradicionalmente utilizado de 2. Desde aquel entonces, el factor de separación espacial “ β ” en la fórmula del modelo ha sido objeto de varios debates. El trabajo hecho por Carroll sugiere que el efecto de la distancia realmente no es uniforme y su relación no es simplemente inversamente proporcional además de ocupar ponderaciones diferentes a la unidad.

El modelo gravitacional en estudios de interacción para el transporte

El modelo gravitacional en aplicaciones de transporte busca medir y jerarquizar las interacciones entre todos los pares origen-destino (*od*) contenidos en un sistema con el fin de formalizar, estudiar y prever los flujos, teniendo como hipótesis básica que todos los viajes tienen su origen y destino en los *centroides* de las zonas y que la elección individual de una ruta en particular se realiza en función de la *minimización* de los costos de viaje.

La formulación convencional del modelo para un par origen-destino aplicado al transporte se muestra en la siguiente figura (3.4):

$$T_{ij} = K_{ij} \frac{V_i \cdot W_j}{S_{ij}^\beta}$$

Figura 3.4 Diagrama conceptual del modelo gravitacional elemental aplicado al transporte. Fuente: Elaboración propia.

Donde:

T_{ij} Es el índice de interacción gravitacional entre un par de localidades.

V_i, W_j Masas respectivas de las localizaciones i y j ,

S_{ij} Función de impedancia que refleja la resistencia a realizar el viaje. Ajusta la atracción relativa de cada zona por la aptitud, deseo o necesidad del viajero. Puede expresarse como distancia euclidiana, distancia sobre la red vial, tiempo de viaje o costo generalizado. Esta función es afectada por el exponente n que expresa su intensidad provocado por el gradiente de separación espacial u otros factores relacionados.

β Fricción del transporte. Relacionada con la eficiencia del sistema de transporte entre las dos localidades. La fricción raramente tiene un comportamiento lineal pues mientras más lejano sea el movimiento, mayor será la fricción del espacio¹. Por ejemplo, una carretera que conecte dos localidades tendrá un índice beta menor que un camino.

K_{ij} Funciona como un factor de balanceo, también es conocido como constante de proporcionalidad o factor de ajuste.

¹ Vea la figura 2.2 “Efecto de la separación espacial sobre la probabilidad de interacción”, Cáp. 2.

Diversificación de los viajes

Es claro que la función de resistencia S_{ij} no es la misma en todas las zonas, incluso dentro de cada una de estas zonas el exponente no es el mismo para todos los tipos de viajes. Esta fue una de las razones que condujeron a clasificar los viajes en función de sus objetivos. Entre más importante el motivo del viaje (por ejemplo trabajo) menor el valor de este exponente. También es necesario clasificar todos los viajes como los basados en el hogar y los no basados en el hogar.

- | | | |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Viajes al trabajo • Viajes a la escuela • Viajes a compras | } | <p>OBLIGATORIOS
<i>Menor exponente</i></p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Viajes sociales o diversión • Otros viajes (médico, hospital, trámites, etc.). | } | <p>OPCIONALES
<i>Mayor exponente</i></p> |

También es posible catalogar por *hora del día*, donde los viajes se clasifican en períodos de hora pico y hora no pico y la proporción de S_{ij} varía conforme la hora del día.

Una última clasificación es *por tipo de persona*, que generalmente se usa las siguientes categorías:

- Nivel de ingresos.
- Propiedad de autos (existen 3 estratos: 1,2 o más autos).
- Estructura y tamaño de la familia.

Para superar esta dificultad diversos autores han introducido al modelo gravitacional, factores específicos β , K , λ , α para ajustar los flujos interzonales, sobre todo en los estudios que requieren mayor detalle.

Exponente de Fricción del Transporte β (beta)

Se pueden destacar dos concepciones entre el conjunto de autores. Los partidarios de la primera sostienen que para mantener la analogía, se ha de atribuir a la variable de la separación espacial (S_{ij}^β) un exponente idéntico al del modelo gravitacional de Newton, es decir $\beta=2$. Entonces la ecuación de la gravitación asume el aspecto siguiente:

$$T_{ij} = K_{ij} \cdot \frac{V_i W_j}{S_{ij}^2}$$

El modelo gravitacional con este exponente de fricción proporciona estimados gruesos de la interacción, y se ha encontrado poco satisfactorio dado que el efecto de la separación espacial puede no variar como el cuadrado de la distancia. Como resultado de esto, en la segunda concepción los investigadores comenzaron a trabajar con valores posibles del parámetro β , obtenidos en función de datos utilizados para calibrar el modelo.

Ello se debe a la convicción que la magnitud de la resistencia de la separación espacial depende de una serie de factores, por ejemplo, del tipo de transporte, del tipo de

traslado, de la especialización regional, del valor de las mercancías, etc. Por consiguiente, a cada tipo de interacción le corresponderá un distinto exponente para la variable β .

Por lo general se considera que el modo de definir la separación espacial no tiene especial importancia para la fuerza del modelo estudiado; es de valor esencial sólo la selección del exponente (Black, 1971). O'Sullivan y Byler (1974) refieren en su trabajo que el exponente variaba con el tiempo, reflejando los cambios locales y los ajustes del transporte, se incrementaba simultáneamente con el crecimiento de la demanda de transporte y se alteraba en proporción inversa al valor de la mercancía. Black (1972) sostiene que:

- 1) Cuanto más grande sea la parte de las exportaciones totales procedentes de un solo productor, tanto más bajo será el valor del exponente; en el caso extremo de no existir más que un punto de oferta de una mercancía homogénea que tiene demanda en otras regiones del sistema (y también la ausencia de toda posibilidad de sustitución), la potencia $\beta=2$;
- 2) Cuanto más grande sea la parte de los flujos totales que tienen un significado local (flujos interregionales) tanto más elevado es el valor de la potencia.

Los estudios realizados por O'Sullivan (1970) han demostrado que el exponente de la variable de la separación tiene un valor más bajo en el caso de las áreas urbanas que en el caso de las rurales y, para Gran Bretaña oscila de 1.3 a 4.8 respectivamente.

Entre los pocos intentos para identificar factores que influyen sobre los cambios de la potencia de la distancia destaca el emprendido por W. R. Black (1973) quién llegó a la conclusión de que en los flujos de mercancías el valor de la potencia es la función de:

- 1) La concentración espacial de la producción,
- 2) La concentración espacial de la demanda y
- 3) La demanda local de una mercancía determinada en el sentido de que:
 - a) existe una relación inversamente proporcional entre la magnitud de la potencia y la concentración espacial de la producción,
 - b) existe una relación inversamente proporcional entre la magnitud de la potencia y la concentración de la demanda y
 - c) existe una relación directamente proporcional entre la magnitud de la potencia y la demanda local de una mercancía determinada.

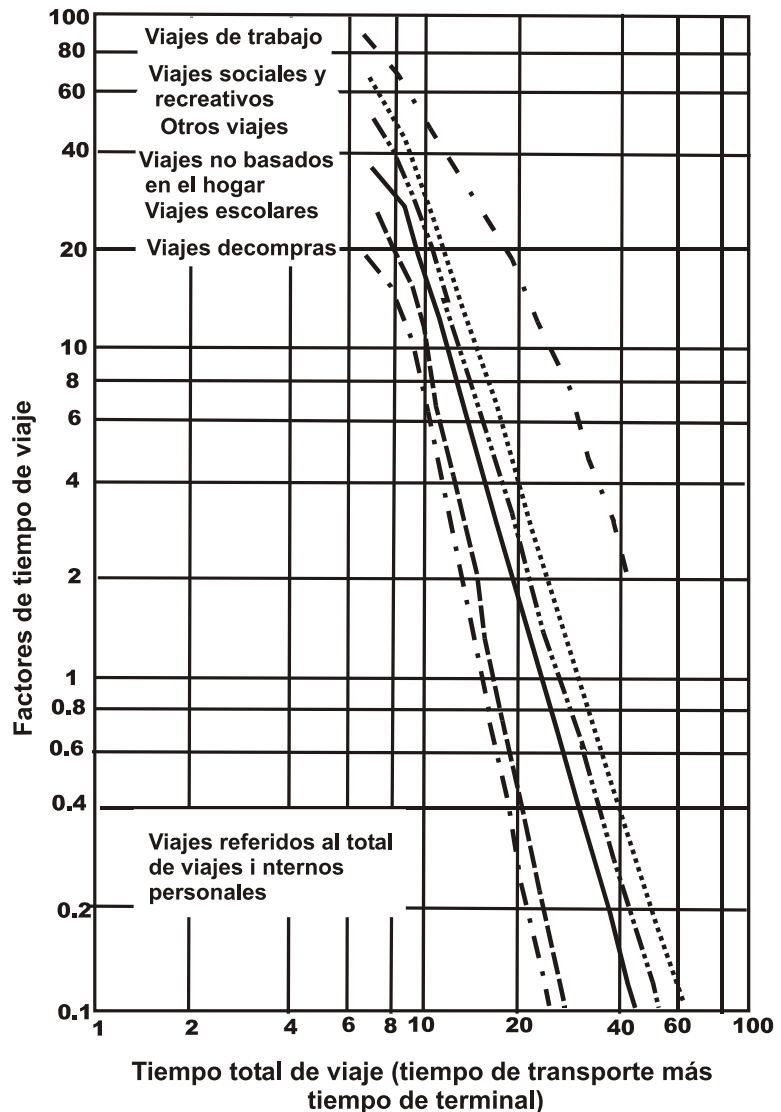
Casi al mismo tiempo, la investigación hecha por Alan Voorhees (1959), se enfocó a cuantificar el valor de este exponente. Basándose en datos de campo origen-destino recolectados para Fort Wayne, Indiana (EU), Voorhees encontró que el valor del exponente de la separación espacial *varía en función del propósito del viaje*. Comparando el exponente para viajes totales entre ciudades (cuyo valor determinó alrededor de 2.5), con el de viajes urbanos (cercano a 1.5), encontró, a cierto grado, el efecto de utilizar diferentes medidas para expresar la separación espacial entre las áreas bajo consideración. La distancia aérea generalmente es utilizada para viajes interurbanos y el tiempo de recorrido para viajes urbanos.

La variación entre estos dos exponentes, sin embargo, puede explicarse en parte por el hecho que *en ninguno de los tiempos de viaje usados se considera el tiempo terminal*, que

es el tiempo que se debe adicionar al tiempo de viaje para medir la congestión en la zona al final de cada viaje. Los viajes entre ciudades la mayoría de las veces son relativamente largos y el efecto de omitir 5 o 6 minutos por tiempo de terminal, probablemente es insignificante. En cambio, en los viajes urbanos, donde el tiempo medio de viaje es muy variable, un tiempo de terminal de 5 o 6 minutos puede o no tener un efecto considerable. Con el fin de determinar el efecto del tiempo de terminal sobre el exponente de separación espacial, Hansen (1959) estudió los resultados obtenidos de un análisis de las características de viaje en Baltimore, Maryland (EU). Su estudio mostró que al agregar 5 o 6 minutos de tiempo de terminal al tiempo de viaje entre zonas, el exponente para viajes totales está alrededor de 2.5, el mismo que para los viajes urbanos.

Análisis posteriores de los datos de Baltimore hechos por Hansen verificaron la investigación anterior referente a la variación de los exponentes por propósito de viaje. En su investigación, utilizando datos de Washington, D.C. (EU), también mostró que el exponente no es constante para todos los incrementos de tiempo. Vea la gráfica 3.1.

Además de estos y otros estudios (Stanford Research Institute, 1962 – Voorhees, 1958), que han mostrado la necesidad de un exponente variable en el modelo gravitacional, existen otros razonamientos teóricos que deben considerarse. Esto fue expuesto matemáticamente por Tanner (1961) en Inglaterra. Él demostró que un exponente constante no puede producir resultados razonables tanto para viajes cortos como para largos a menos que el rango de variación entre los viajes más cortos y más largos en el área sea pequeño.



Gráfica 3.1 Factores de tiempo de viaje para Washington, D.C., 1955. Fuente: U.S. Department Of Transportation (1983).

Whitmore (1965) por su parte, resalta en su estudio que la variación en los exponentes de tiempo de viaje entre ciudades se debe a otros factores con excepción de los que miden la separación espacial. Él encontró que el tamaño de la ciudad, población y propiedad de auto ayudan a explicar la variación. El exponente de tiempo de viaje β no es constante para todos los intervalos de tiempo para cada propósito de viaje. Esta variación es más pronunciada para viajes de trabajo. Para la mayoría de los viajes, el exponente generalmente se incrementa conforme el intervalo de tiempo se incrementa.

Factores de ajuste de zona a zona K

El exponente de viaje β por sí solo, cuando se considera su relación con el uso de suelo, no explica completamente la propensión a viajar entre dos puntos. Los patrones de viaje también pueden ser afectados por acoplamientos sociales y económicos, que hasta la fecha no han sido completamente identificados o cuantificados. Por lo tanto, los factores secundarios de ajuste “Kij” deben ser tomados en cuenta pues reflejan el efecto de los patrones de viaje sobre las características socioeconómicas de zonas o porciones particulares del área en estudio que nos son tomadas en cuenta en otras variables del modelo. Éstos pueden ser pronósticos en función de las características socioeconómicas estimadas para el uso futuro del suelo. Las razones de añadir estos factores son:

1. Las estratificaciones por propósito de viaje no son precisas para medir todas las diferencias básicas en los patrones de viaje. Por ejemplo, es posible que todos los viajes de trabajo producidos en una zona en particular son hechos por trabajadores industriales. Cuando se distribuyen estos viajes en el modelo de gravedad, la mayor proporción de estos viajes serán enviados a las zonas más cercanas con mayor número de centros de empleo, aunque este tipo de empleo no sea el solicitado. Esto significa que muchos de estos trabajadores industriales pueden ser enviados a oficinas y establecimientos comerciales, principalmente por la cercanía de los hogares de esos trabajadores. Aunque esto pueda superarse haciendo otra estratificación de viajes, esto crearía problemas en el pronóstico de los viajes.
2. Es posible desarrollar factores de tiempo de viaje (β) para cada categoría de propósito de viaje, sin embargo existe evidencia que estos factores dependen de zona a zona en función de las características de las personas que viven ahí. Estos factores incluso pueden depender de la distribución del uso de suelo en zonas inmediatas o adyacentes.
3. Existe evidencia que factores como el ingreso o la densidad residencial pueden influir en los ajustes de zona a zona. Por ejemplo en Washington, D.C. (*U.S. Department Of Transportation, 1983*), se ha observado que las familias de bajos ingresos no están predispuestas a trabajar en el centro de negocios del distrito como las familias con ingresos altos. Esta observación se hizo por la comparación directa de los resultados del modelo gravitacional con la encuesta origen-destino.

En algunos casos la utilización de los factores de ajuste puede ser significativa y en otros no. Generalmente, en las áreas urbanas grandes, donde existen varios tipos de empleo,

compras y recreación estos ajustes son necesarios. Aún con varias limitaciones en el entendimiento del factor K_{ij} , las pruebas determinan el grado de los ajustes requeridos y los procedimientos para incorporarlos al modelo deben ser ingeniosos y revisados. Estos procedimientos requieren un análisis de las diferencias entre los intercambios de viaje calculados en la calibración final del modelo y medidos con la encuesta O-D.

Estudios necesarios para determinar los parámetros del modelo

Para proporcionar estimados confiables de los parámetros del modelo gravitacional debe existir en disponibilidad datos efectivos con suficiente detalle y con estabilidad estadística propia.

a) Encuesta origen – destino

Los datos deseados pueden recolectarse mediante una entrevista extensa directamente en los hogares haciéndose de persona a persona. Bajo ciertas circunstancias, datos satisfactorios pueden obtenerse mediante entrevistas telefónicas, tarjetas o cuestionarios por correo. Para todos los casos, debe ejercerse suficiente control para asegurar que los resultados obtenidos estén completos y se encuentren estadísticamente inalterados.

También es importante que los siguientes elementos sean obtenidos de cada unidad colectada:

- i. Dirección de cada unidad de residencia
- ii. Número de personas que viven en cada unidad de residencia.
- iii. Número de autos poseídos por cada unidad de residencia
- iv. Ocupación del jefe de familia
- v. Para cada viaje hecho por cada residente de la unidad de residencia:
 - Identificación de la persona que realiza el viaje
 - Identificación del viaje
 - Dirección de origen del viaje
 - Dirección de destino del viaje
 - Hora de inicio
 - Hora de final
 - Propósito
 - Modo de viaje

En varios estudios de transporte se utilizan muestras pequeñas de las encuestas O-D en porcentajes que van del 0.1 al 1 por ciento del total. Otro aspecto importante a considerar es el que tipo de procedimiento debe utilizarse para actualizar una encuesta de este tipo.

Las investigaciones han demostrado que una muestra pequeña arroja poca información sobre los viajes en una zona (Constantine B., Bouchard R. y Clyde E., 1964). La producción y atracción de tasas de viajes no puede obtenerse sobre una zona mediante este tipo de estudios. En el presente, la técnica de muestreo aleatorio se considera útil solamente para estudios generales de gran extensión o como actualizaciones de estudios más detallados.

A veces es recomendable realizar otro tipo de entrevistas en el hogar por ejemplo, encuestas tipo *cluster* (o segmentadas), en donde un pequeño porcentaje de las unidades de residencia son entrevistadas. Las unidades de residencia que son entrevistadas se segmentan en zonas preseleccionadas que reflejen rangos de afectación de los viajes como la densidad

residencial, tasas de posesión de auto, ingreso, tamaño de familia, distancia al distrito central de negocios y la distancia más cercana a los lugares de trabajo o centros comerciales. Posteriormente, un tamaño estándar de la muestra (basada en la población) es entrevistada en las zonas seleccionadas.

Una de las principales razones de hacer un muestreo tipo clúster es obtener índices de generación de viajes desde el hogar. Puesto que las zonas seleccionadas exhiben rangos en los factores que afectan los viajes, relacionando estas características a los viajes generados por los residentes de cada zona, se puede obtener información útil para estimar las tasas de futura generación de viajes desde el hogar, siempre y cuando el universo total de viajes haya sido registrado (Heanue K. E., Hamner L. y Hall R.M., 1964).

En adición de la entrevista en el hogar para viajes internos, deben realizarse entrevistas externas en los límites de la zona y entrevistas a autobuses y taxis (New York state department of public works, subdivision of transportation planning and programming, 1962) para obtener una imagen de los viajes urbanos realizados dentro del área en estudio.

b) Inventario de instalaciones de transporte

Además de contar con datos suficientemente confiables sobre los patrones de viaje, es indispensable la información sobre la mayor parte de las instalaciones de transporte en el área. Para la mayoría de las secciones en las autopistas e instalaciones de transporte se requiere:

- i) Localización
- ii) Dimensiones físicas
 - Longitud
 - Ancho
 - Número de carriles
- iii) Velocidad de viaje promedio en horas pico y no pico.
- iv) Señalización, requerimientos de estacionamiento según el sentido del viaje y otros datos para el cálculo de la capacidad.
- v) Volúmenes de tráfico existentes.

Esta información es utilizada para calcular el tiempo de viaje entre zonas.

c) Otros inventarios.

Este rubro incluye información socioeconómica referente a los patrones de viajes y a la separación espacial entre zonas no contemplada en las encuestas origen-destino y que son necesarios para la calibración del modelo.

Exponentes de distribución para las variables de masa y separación

Los exponentes de distribución han sido incorporados para afinar la modelación mediante factores específicos que ajustan los flujos entre las zonas y son muy útiles en los estudios más detallados. Esta forma es necesariamente más laboriosa, pero también es más flexible y se le llama *modelo gravitacional compuesto* y consiste en lo siguiente:

$$T_{ij} = K_{ij} \frac{V_i^\lambda W_j^\alpha}{S_{ij}^\beta}$$

Donde:

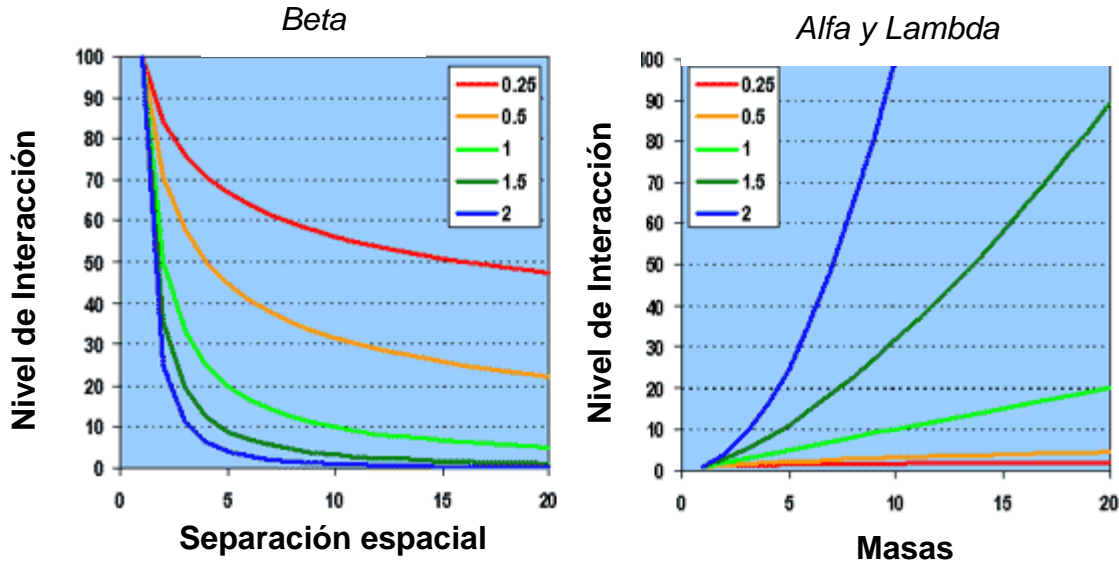
- λ (lambda): *Potencial de generar movimientos.* Para movimientos de gente, frecuentemente se relaciona con su bienestar. Por ejemplo, si se investigan los movimientos minoritarios, es lógico inferir que para una población igual, una localidad que tenga mayor nivel de ingreso generará más movimientos.
- α (alpha): *Potencial de atraer movimientos.* Relacionado con la naturaleza de las actividades económicas. Por ejemplo, con una población igual, un centro que tenga actividades comerciales importantes, atraerá más movimientos.

Calibración del modelo gravitacional

Entre las dificultades relacionadas con el uso de los modelos de interacción espacial, y notablemente en el modelo gravitacional, destaca la concerniente a su calibración que *consiste en, encontrar el juego de parámetros (constante y exponentes) para asegurar que los resultados estimados son similares a los flujos observados.* Es imposible saber si el proceso de calibración es exacto sin comparar los resultados estimados con evidencia empírica. Alterar el valor de *beta*, *alfa* y *lambda* influirá en las interacciones espaciales estimadas. Además, el valor de los parámetros puede variar en el tiempo debido a factores como innovaciones tecnológicas y desarrollo económico. Por ejemplo, mejoras en la eficiencia del transporte generalmente reduce el valor del exponente *beta* (fricción del espacio). Frecuentemente, se le asigna un valor de 1 a los parámetros, y son progresivamente alterados hasta que los resultados estimados sean similares a los observados.

La calibración también puede considerarse para diferentes matrices O/D de acuerdo a la *edad, ingreso, género, tipo de mercancía y elección de modo.* Una buena parte de la investigación científica en el transporte y planeación regional busca encontrar parámetros adecuados para las ecuaciones de interacción espacial. Esto es generalmente un proceso costoso que consume bastante tiempo. Una vez que el modelo de interacción espacial ha sido validado para una ciudad o una región, puede utilizarse para propósitos de simulación y predicción.

En la gráfica 3.2 a continuación se muestran los efectos de los exponentes de distribución sobre los niveles de interacción. Variaciones en los exponentes *beta*, *alfa* y *lambda* tienen diferentes impactos sobre la magnitud de las interacciones espaciales. Por lo tanto, la relación entre distancia e interacciones espaciales cambiará de acuerdo al exponente *beta*. Si el valor de *beta* es alto (mayor que 0.5), la fricción de la distancia será mucho más importante (disminución brusca de las interacciones espaciales) que con un valor bajo de *beta* (por ejemplo 0.25). Un *beta* de 0 significa que la distancia no tiene efectos y que las interacciones se conservan iguales.



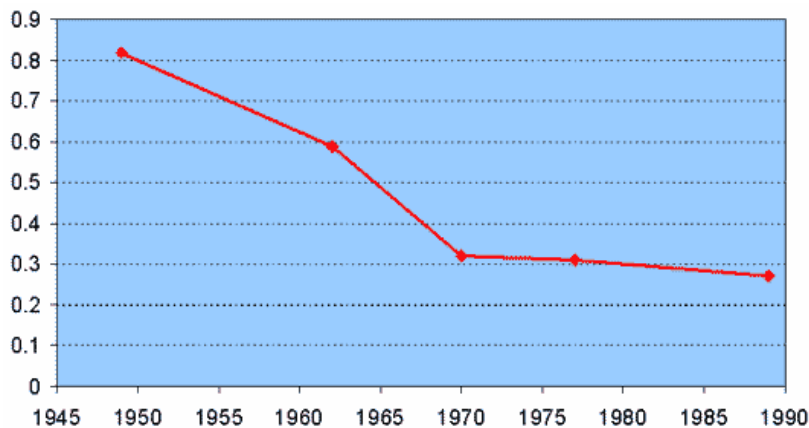
Gráfica 3.2 Efectos de beta, alfa y lambda en las interacciones espaciales.

Fuente: <http://hypergeo.free.fr/>

Los exponentes *alfa* y *lambda* tienen el mismo efecto sobre el nivel de interacción. Para un valor de 1, hay una relación lineal entre la población (o cualquier otro atributo de peso) y el nivel de interacciones. Cualquier valor más grande que 1 implica un crecimiento exponencial del nivel de interacción conforme la población crece.

También es de hacer notar que el exponente de tiempo de viaje β puede diferir por propósito e importancia del viaje, generalmente decrece conforme el viaje es más importante. Por ejemplo, los viajes de trabajo aparecen como los más importantes, y tienen un exponente menor que los viajes sociales-recreativos.

Las *innovaciones tecnológicas*² tienen impactos sobre la fricción del espacio, la cual se ve reflejada en la reducción del exponente *beta* en los modelos de interacción espacial. En la gráfica 3.3 se muestran los impactos significativos por la aparición de aviones de reacción en la reducción de este exponente en los años sesentas.



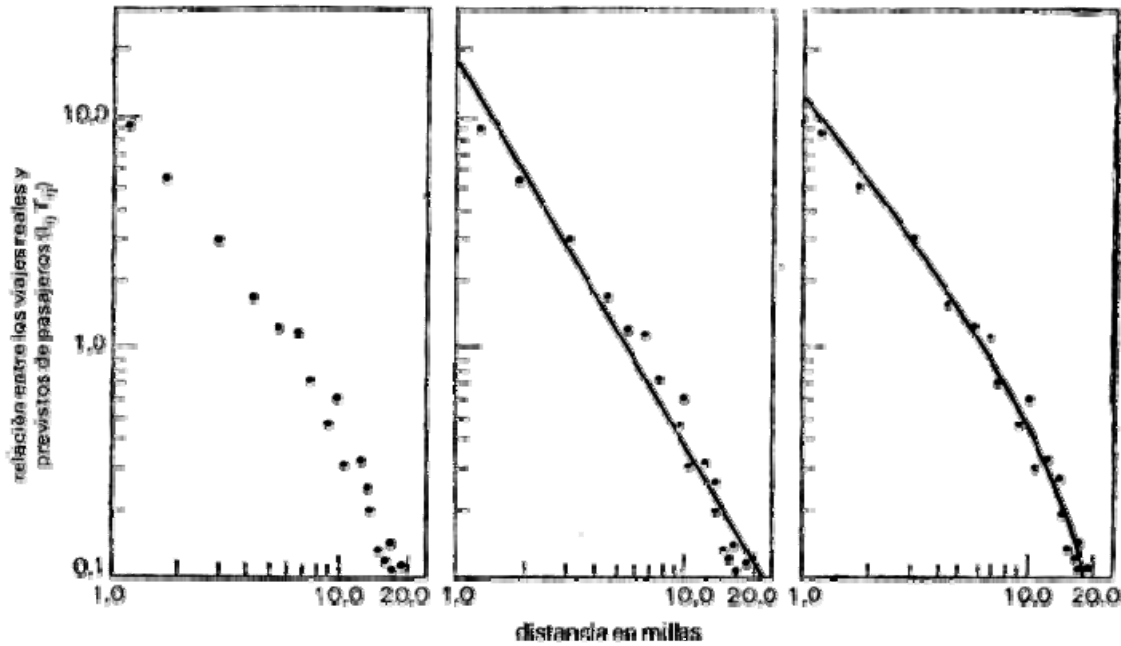
Gráfica 3.3 Valores del exponente Beta para transportación aérea en Chicago, 1949-1989.

Fuente: Taaffe, Gauthier y O'Kelly (1995).

² Vea la teoría de la difusión espacial en el Cap. 1.

Relación entre las masas y distancias: selección de la función

La selección de una función general del modelo que describa con la mayor precisión posible las relaciones entre las masas y la impedancia es tarea difícil. Habitualmente se proponen funciones sencillas que se expresan por una línea recta a escala doblemente logarítmica (P. Haggett, A. D. Cliff y A. Frey, 1977), aunque muchos estudios hacen dudar de si estas funciones pueden aplicarse (W. Isard, 1965, 1971). Las relaciones presentadas en la gráfica 3.4 pueden expresarse tanto por la línea recta, como por la parábola de segundo orden.



Gráfica 3.4 Correspondencia entre la distancia y la relación entre los viajes reales y previstos de pasajeros. Región metropolitana de Detroit. (Fuente: W. Isard, 1965).

El trabajo de M. Helvig (1964) ofrece un ejemplo de otro enfoque. Partiendo de los estudios de los transportes por carretera efectuados sobre el área de Chicago, el autor dedujo empíricamente la ecuación de la gravitación en forma de cuadrados:

$$I_{ij} = 0.42 \left[\sqrt{\frac{M_i M_j}{d_{ij}^2}} \right]^2 + 4.9 \left[\sqrt{\frac{M_i M_j}{d_{ij}^2}} \right] + 160$$

La ecuación anterior no es un intento de generalización, sino que contempla una situación de investigación concreta. Al mismo tiempo indica que pueden existir muchos modos de transformar el modelo gravitacional con el fin de crear un instrumento adecuado para los estudios empíricos.

Tiempo de viaje entre zonas y elección de rutas

La premisa básica es que todos los viajes tienen su origen y destino en los centroides de las zonas y la elección de las rutas entre cada par de puntos origen-destino es la suposición de que el actor es un *viajero racional*, es decir escoge la ruta que le ofrece los menores costos percibidos. Existen diversos factores que influyen en la elección de ruta manejada entre dos puntos; estos incluyen el tiempo de viajar, la distancia, el costo monetario, la velocidad de flujo libre, la capacidad de las vías, la congestión y atascos, el tipo de maniobras requeridas, el tipo de camino, el paisaje, la presencia de señales, las obras existentes en las vías, la constancia en el tiempo de viaje y los hábitos. La producción de una *expresión generalizada de costos* que incorpore todos estos elementos es una tarea difícil. Además, no es práctico tratar de modelar todos los factores en un modelo de asignación del tráfico, y por lo tanto las aproximaciones son inevitables.

La aproximación más común es considerar sólo dos factores como impedancias en la elección de rutas: el *costo de tiempo de viaje* y el *costo monetario*; además, se considera el costo monetario proporcional a la distancia del viaje. La mayoría de los programas de asignación del tráfico permiten que el usuario asigne pesos al tiempo de viajar y la distancia para representar las percepciones de los conductores en cuanto a estos dos factores. La suma ponderada de estos dos valores entonces llega a ser un *costo generalizado* utilizado para estimar la elección de ruta.

Como se ha mencionado anteriormente, una red puede representarse en forma de un grafo con arcos y nodos. Los analistas calculan frecuentemente las impedancias producidas por el tiempo de viaje utilizando los *tiempos de conducción* sobre la red de la *ruta óptima*³ entre cada par de centroides de los sitios en estudio. Para realizar este procedimiento se requieren dos parámetros:

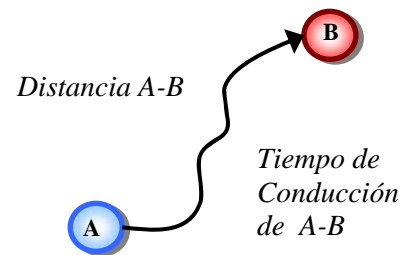
- 1) *Velocidad de desplazamiento para cada tramo de la red*: Es un dato obtenido a partir de observaciones en campo, experiencia del analista, fuentes oficiales de velocidades máximas permitidas por tramo o una velocidad asignada por tipo de vía.
- 2) *Longitud del conjunto de segmentos de la red que conforman la ruta óptima entre cada par O-D*. Este dato puede efectuando mediciones directas con odómetro o mediante fuentes cartográficas. Con el uso de Sistemas de Información Geográfica, este dato puede calcularse con relativa facilidad.

Para calcular el tiempo de conducción de un arco que forma parte de una red se emplea la siguiente fórmula:

$$Velocidad_{A-B} \text{ (km./hr.)} = \frac{Distancia_{A-B} \text{ (km.)}}{Tiempo \text{ de conducción}_{A-B} \text{ (hr.)}}$$

Despejando la variable requerida:

$$Tiempo \text{ de conducción}_{A-B} \text{ (hr)} = \frac{Distancia_{A-B} \text{ (km)}}{Velocidad_{A-B} \text{ (km/hr)}}$$



³ Vea los algoritmos de la teoría de grafos en el capítulo anterior.

La siguiente figura (3.5) muestra los atributos básicos para calcular el tiempo de conducción de los arcos pertenecientes a una red:

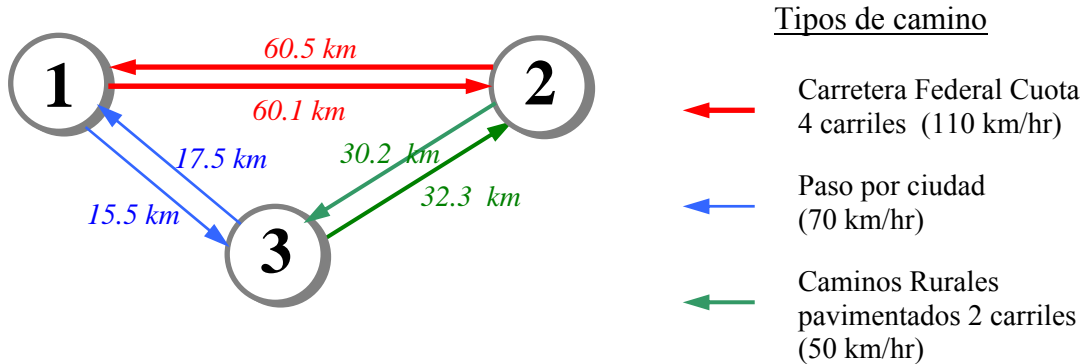


Figura 3.5 Sistema de 3 localidades con sus respectivas vías de comunicación.
Fuente: Elaboración propia, las velocidades según el tipo de camino fueron tomadas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Dado que se requiere el resultado en minutos, se emplea la siguiente relación: $\frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} = \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}}$

Por lo tanto la fórmula a emplear es: tiempo (minutos) = $\left(\frac{\text{distancia (km)}}{\text{velocidad (km/hr)}} \right) * 60$

A continuación se muestra el cálculo realizado con ayuda de una hoja electrónica:

origen	destino	distancia (km.)	Velocidad (km./hr.)	Tiempo (min.)
1	2	60.1	110	33
1	3	15.5	70	13
2	1	60.5	110	33
2	3	30.2	50	36
3	1	17.5	70	15
3	2	32.3	50	39

Tabla 3.1 Cálculo del tiempo de conducción sobre la red.
Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de viaje de zona a zona es la suma del tiempo de conducción más los tiempos de terminal dentro de las zonas de origen y destino (vea la figura 3.6). En consecuencia, es necesario establecer una medida para el tiempo de terminal de cada zona en el área en estudio para combinarla con la información del tiempo de desplazamiento sobre la red. Los tiempos de terminal son añadidos para permitir diferencias en los tiempos de estacionamiento y recorrido a pie entre las zonas, como causa de las diferencias de congestión y servicios de estacionamiento. Esto proporciona una medida más real de la separación espacial actual (en tiempo) entre zonas a escala de estudio urbano y la manera en que influye en las decisiones de los viajeros en sus lugares de trabajo, compras, etcétera.

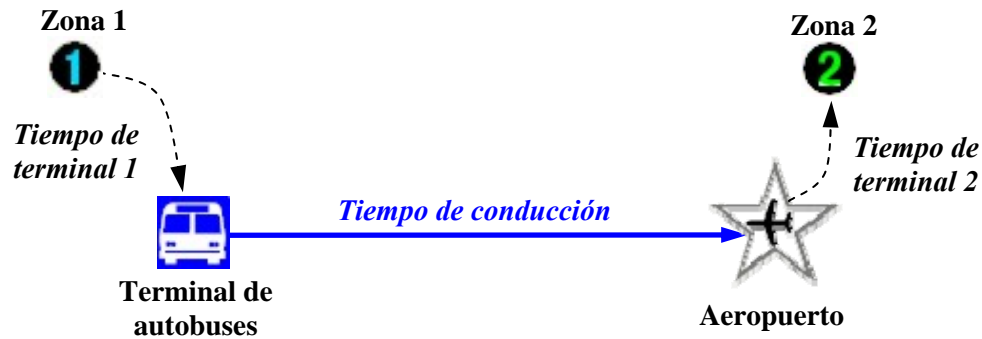


Figura 3.6 Factores que intervienen en la cuantificación del tiempo de viaje. Fuente: Elaboración propia.

Los tiempos de terminal, pueden obtenerse haciendo promedios de datos con las distancias a pie, que generalmente están disponibles de las encuestas de estacionamiento. También pueden obtenerse a juicio personal. Una estimación razonable de estos tiempos es mejor que omitirla completamente. Los tiempos de aquellos viajes que empiezan y terminan en la misma zona, también deben ser estimados.

Los tiempos de terminal resultan a partir de las siguientes condiciones:

1. El tiempo invertido en encontrar un lugar para estacionarse al final de los viajes no realizados en el hogar.
2. El tiempo invertido en caminar del lugar de origen al viaje, puede ser el hogar, la oficina, tienda o lugar de recreación.
3. El tiempo invertido en caminar del lugar de origen, ya sea el hogar, la oficina o cualquier otro al lugar de estacionamiento.
4. El tiempo invertido en llegar del lugar de estacionamiento al sistema de calles al origen o final del viaje.

No existen reglas absolutas para determinar los tiempos de terminal. Varios métodos se han empleado en estudios de transporte, incluyendo:

1. La asignación subjetiva de un tiempo de terminal para cada zona basado en el conocimiento del área en estudio o por datos derivados de estudios como encuestas de estacionamiento,
2. Relación de los valores de tiempo de terminal con la distancia desde el Centro de Negocios de la zona,
3. El uso de un índice que es una medida relativa de las condiciones de congestión en la zona.

Pueden utilizarse métodos subjetivos asignando tiempos de terminal a cada zona en una pequeña área urbana (Constantine, Bouchard, Clyde, 1964). De los resultados obtenidos por estos investigadores en un estudio, para el área central de negocios de una ciudad concluyeron que un promedio de dos minutos era invertido en caminar desde el lugar de estacionamiento hasta la tienda u oficina de destino último. Adicionalmente, se estimó un promedio de tres minutos en encontrar lugar de estacionamiento. Consecuentemente, para

todas las zonas en el distrito central de negocios, un tiempo de terminal de cinco minutos fue utilizado; para zonas residenciales, es suficiente con un tiempo terminal de un minuto y para zonas con montos moderados de actividad comercial, valores intermedios pueden ser usados. Obviamente estos parámetros varían mucho de una ciudad a otra, dependiendo de las características particulares, sin embargo estos estudios marcan la pauta para obtenerlos.

Otro método utilizado para incorporar los tiempos de terminal en el análisis es mediante la modificación de la red. Utilizando este procedimiento, los tiempos de terminal son añadidos mediante uniones simuladas que conectan los centroides a la red carretera.

Una vez estimados los tiempos de viaje como impedancias para los arcos, es posible la elección de la ruta óptima en tiempo para cada par origen-destino.

El análisis de las redes de transporte es un área de aplicación en donde el cómputo de las *rutas óptimas* implica problemas fundamentales. Su complejidad ha generado investigaciones extensas: Deo (1984), Cherkassky et al. (1993), Zhan et al. (1996 y 1997).

Aunque la literatura sobre el tema agrupa los problemas de rutas óptimas en forma diferente, es posible discernir que en general existen 4 tipos: I) Problemas uno a uno, II) Uno a todos, III) Todos a uno o IV) Todos a todos, como se muestra a continuación en la figura 3.7.

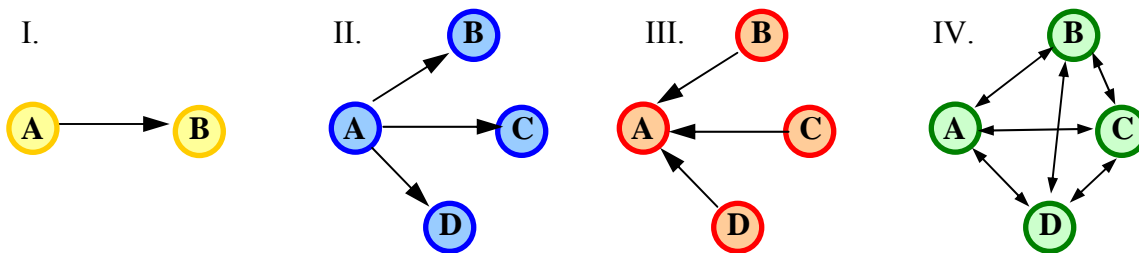


Figura 3.7 Tipos de problemas de rutas óptimas. Fuente: elaboración propia.

Los paquetes de cómputo disponibles usualmente hacen análisis uno a uno o todos a todos de los que se derivan rutas subsecuentes. La mayoría de las investigaciones publicadas sobre este tema trata de redes con ajuste en topología y costos.

El cálculo de las rutas óptimas resulta de gran interés para la implementación de modelos gravitacionales realistas. Mediante el cálculo de rutas óptimas, la distancia entre pares o-d puede medirse de forma precisa a través de una red que realmente canaliza los movimientos en lugar de utilizar las distancias euclidianas. Algunos SIG permiten calcular la ruta óptima entre dos puntos cualesquiera dentro de una red topológicamente construida considerando la menor impedancia posible utilizando los algoritmos de Moore (1957) y Dijkstra (1959). Para ejemplificar el funcionamiento general de estos algoritmos vea la siguiente figura (3.8). Suponga que se desea encontrar la ruta óptima entre las ciudades A y K. El grafo de la figura representa las diversas rutas posibles con sus respectivos costos por atravesar cada arco (o segmento de la red). El problema consiste en determinar el trayecto óptimo que minimice los costos.

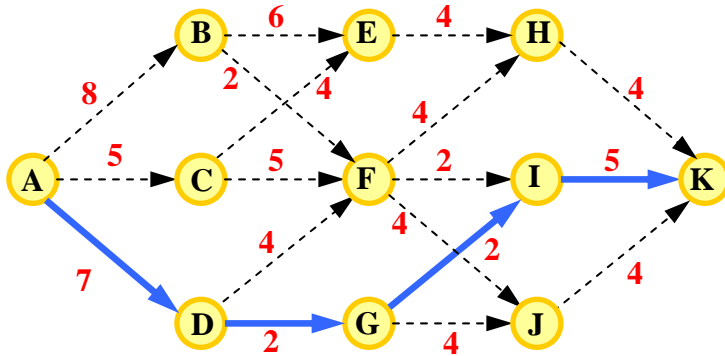


Figura 3.8 Grafo que representa un sistema de ciudades comunicadas por la red vial. En color azul se representa la ruta óptima que minimiza el costo entre el nodo A y el K.

Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo de Moore-Dijkstra analiza todas las trayectorias posibles entre ambos puntos y elige aquella que representa el menor costo total. La solución consiste en el trayecto que hace parada en las ciudades A-D-G-I-K con un costo total de $7+2+2+5=16$.

Árboles de Caminos

Los problemas de rutas óptimas que conforman árboles de caminos son aquellos que tienen relaciones *uno a todos*, *todos a uno* y *todos a todos*.

Dentro de las categorías de la teoría de grafos, se llama árbol a un conjunto de arcos y nodos unidos entre sí de tal modo que no haya más de una vía de enlace entre cada dos nodos. Por consiguiente, un árbol de n nodos se compondrá de $n-1$ arcos. Vea la siguiente figura (3.9), se tienen 14 nodos y 13 arcos en un árbol de caminos construido por las rutas óptimas a partir de la localización “X” (verde) hacia las “Y” (azules).

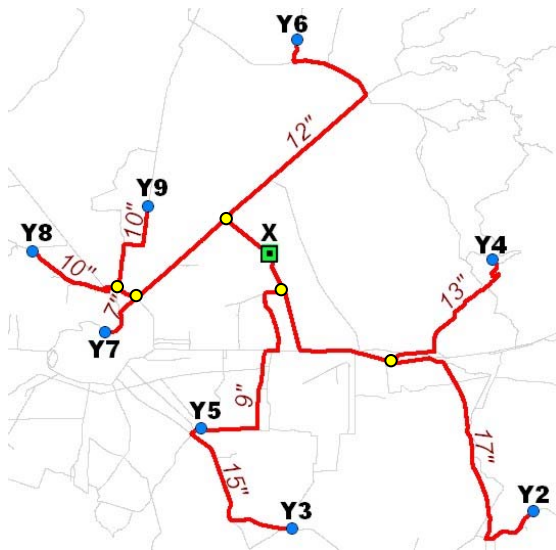


Figura 3.9 Izquierda: árbol de caminos con el tiempo de recorrido entre cada par o-d según las impedancias contenidas en la red vial (fondo). Abajo: tabla con la estructura de los datos en un SIG.

Fuente: Elaboración propia.

Shape	Origen	Destino	Tiempo (min)
PolyLine	X	Y7	7
PolyLine	X	Y5	9
PolyLine	X	Y9	10
PolyLine	X	Y8	10
PolyLine	X	Y6	12
PolyLine	X	Y4	13
PolyLine	X	Y3	15
PolyLine	X	Y2	17

Los árboles tienen usos importantes en la planeación del transporte pues son empleados para extraer información de costos en una red. Por ejemplo, se puede obtener el tiempo total de viajar entre dos zonas al seguir la secuencia de los arcos en el árbol por conectarlos y acumular sus tiempos de viajar. Se pueden determinar árboles construidos por otros atributos, como los costos generalizados, la distancia, el número de nodos, etc.

También es posible aplicar otro tipo de procedimientos como el análisis de *jerarquía de arcos* a los árboles de rutas óptimas (figura 3.10). Esto consiste en segmentar las rutas óptimas en sus intersecciones y estimar el número de arcos sobrepuestos.

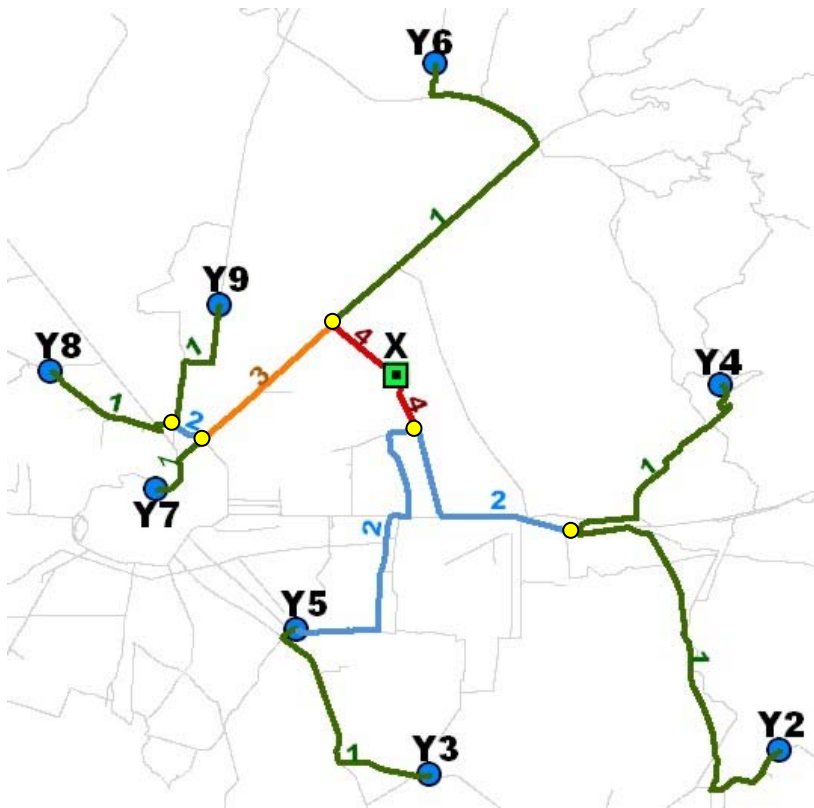


Figura 3.10 Análisis de jerarquía de arcos al árbol de rutas óptimas mostrado en la figura anterior (3.9). Los números sobre los arcos indican el número de veces que es utilizado para comunicar el nodo “X” con algún nodo “Y”. Fuente: Elaboración propia.

La jerarquía de arcos permite identificar la conectividad que proporciona cada arco que conforma el árbol de rutas óptimas.

Esto sirve para producir información sobre cuáles pares O-D probablemente utilizarán un arco particular.

En la tabla de la derecha se muestra la estructura de los datos producto de un análisis de jerarquía de arcos en un SIG. Se tiene un identificador para cada arco del árbol (*LineID*), Nodos de origen - destino y la Jerarquía.

Shape	LineID	Origen	Destino	Jerarquía
PolyLine	1	X	Y7	1
PolyLine	2	X	Y7	3
PolyLine	3	X	Y7	4
PolyLine	4	X	Y5	2
PolyLine	5	X	Y5	4

La información contenida en la tabla se interpreta de la siguiente forma: La ruta óptima que conecta al nodo X con el Y7 esta compuesta por tres arcos (*LineID* = 3, 2 y 1) con diferentes jerarquías cada uno (4, 3 y 1 respectivamente).

El análisis de jerarquía de arcos, también permite identificar los nodos que probablemente serán afectados por cambios en la red, como podrían ser bloqueos o construcción de nuevos arcos. Además, se le puede usar para acordonar una matriz de viaje para un área más pequeña de estudio; en este caso se usan los arcos significativos para identificar puntos de entrada y salida al núcleo del área de estudio.

Otro uso de los árboles de caminos es con la creación de contornos de isocronas. En la Figura de la derecha (3.11) se muestran los resultados obtenidos por las rutas óptimas en intervalos de dos minutos. Este tipo de análisis es útil para identificar el patrón de accesibilidad de un punto de origen y determinar el área de servicio cubierta al viajar por una red con costos asignados a los arcos.

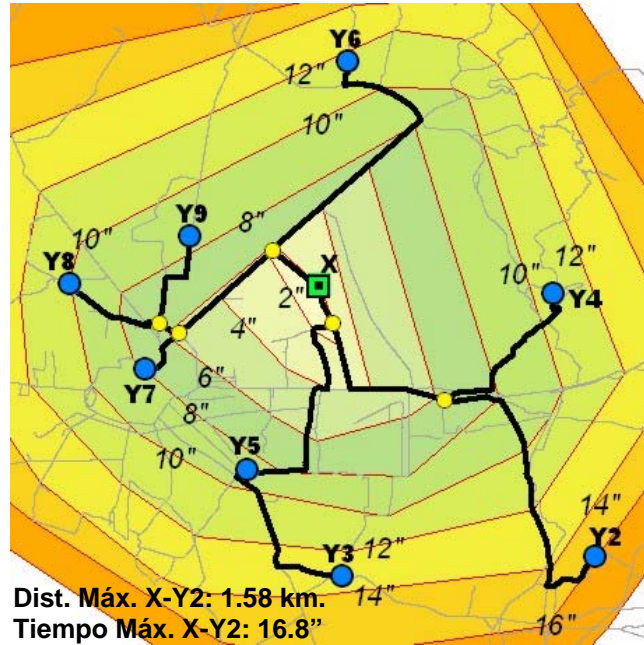


Figura 3.11 Contornos de isocronas en intervalos de 2 minutos de tiempo de conducción sobre la red vial a partir del nodo X.

Fuente: Elaboración propia, basado en U.S. Department Of Transportation, 1983.

El método más sencillo para elección de rutas y asignación es mediante el procedimiento llamado “todo o nada”. Éste supone que no hay efectos de congestión, que todos los conductores consideran los mismos atributos para la elección de rutas y que los perciben y valorizan de la misma manera. La ausencia de los efectos de congestión quiere decir que los costos en los arcos son fijos; la suposición de que todos los conductores perciben los mismos costos quiere decir que cada conductor de i a j tiene que escoger la misma ruta. Así, se asignan todos los conductores a una ruta entre i y j y no se asigna ningún conductor a otras rutas menos atractivas. Estas suposiciones probablemente son razonables en redes dispersas y no congestionadas donde hay pocas rutas alternativas y son muy diferentes en términos de costo.

Se puede atribuir el hecho que los conductores opten por rutas diferentes cuando viajan entre los mismos pares origen-destino, a dos razones:

- Diferencias en las percepciones individuales de lo que constituye la “ruta óptima”; individuos diferentes no sólo pueden incorporar factores diferentes en su función generalizada de costos sino percibirlos de maneras distintas.
- Los efectos de congestión, que primero afectan a las rutas más cortas y hacen sus costos generalizados comparables a rutas que inicialmente fueron menos atractivas.

Tipos particulares de metodologías son más adecuados a la representación de una o más influencias. Sus funciones básicas son:

- Identificar un conjunto de rutas que se pueden considerar atractivas a los conductores; se guardan estas rutas en una estructura particular de datos llamada un árbol y por lo tanto con frecuencia se llama esta tarea la etapa de construcción del árbol.

- Asignar proporciones adecuadas de la matriz de viaje a estas rutas o árboles; o asignar flujos a los arcos en la red.
- Buscar la convergencia; muchas técnicas siguen un modelo iterativo de aproximaciones sucesivas a una solución ideal.

La asignación todo o nada generalmente es de interés limitado al planificador de transportes; sin embargo se le puede usar para representar una clase de “línea de deseo”, eso es lo que a los conductores les gustaría hacer en la ausencia de la congestión. Sin embargo, su aplicación más importante es como componente básico para otros tipos de técnicas de asignación, por ejemplo métodos de equilibrio y estocásticos.

En el presente trabajo para desarrollar el modelo gravitacional se optó por hacer la asignación de rutas mediante el algoritmo “*todo o nada*” por considerarse adecuada debido a las siguientes razones:

- 1) Por la escala de análisis existen pocas rutas alternativas que son muy diferentes en costo.
- 2) La información era limitada.
- 3) Es el tipo de asignación que tiene incorporada la paquetería comercial disponible por el autor al momento de desarrollar el ejercicio⁴. Si bien era posible desarrollar una metodología más completa para esta fase de la modelación, la premura del tiempo para obtener resultados no lo permitió.

Determinación de los tiempos de viaje intrazonales.

Los viajes intrazonales son aquellos producidos en el interior de una zona. Este tipo de viajes según la teoría de grafos son representados como se indica en la figura 3.12.a, donde el origen y destino de un viaje es el mismo centroide. Para determinar los tiempos de viaje dentro de una zona, puede ser necesario aumentar la escala de análisis y considerar cada zona como un conjunto de subzonas con sus respectivos centroides como se indica en la figura 3.12.b. Para las zonas y subzonas los centroides no corresponden necesariamente al centroide geométrico, generalmente son sitios representativos por su producción y/o atracción de viajes, o lugares importantes como las cabeceras municipales, oficinas de gobierno, lugares históricos, monumentos, etcétera.

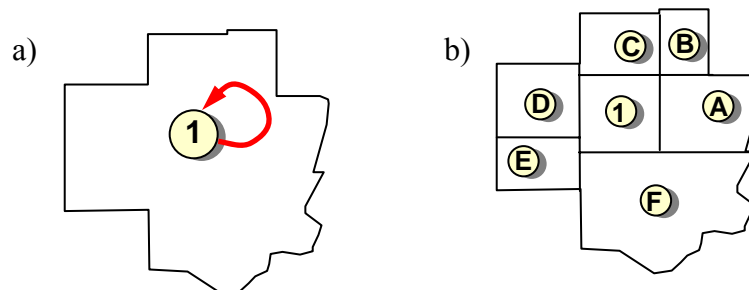


Figura 3.12 a) Representación por grafo de los viajes intrazonales para la zona 1. b) Subzonas contenidas en la zona 1 con sus respectivos centroides. Fuente: Elaboración propia.

⁴ Arcview GIS 3.3, Network Analyst. ESRI, 2003.

3. EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS EN EL TRANSPORTE

El uso de subzonas es una forma de construir *árboles de caminos simplificados* en los que se incluyan valores de tiempos de terminal en los nodos representativos del sistema en estudio. Las subzonas, dependiendo de la escala de análisis pueden ser predios, colonias, agebs, distritos, municipios, áreas de mercado, regiones, estados, etcétera.

La siguiente figura (3.13) basada en el trabajo del Departamento de Transporte de EU. (U.S. Department Of Transportation, 1983), ilustra un método para obtener los tiempos de manejo o de acceso a pie de subzonas adyacentes al centroide principal (1). A este procedimiento se le conoce como cálculo de los *tiempos medios*. El promedio de tiempo de manejo de los centroides adyacentes al centroide 1 es de 3.6 minutos.

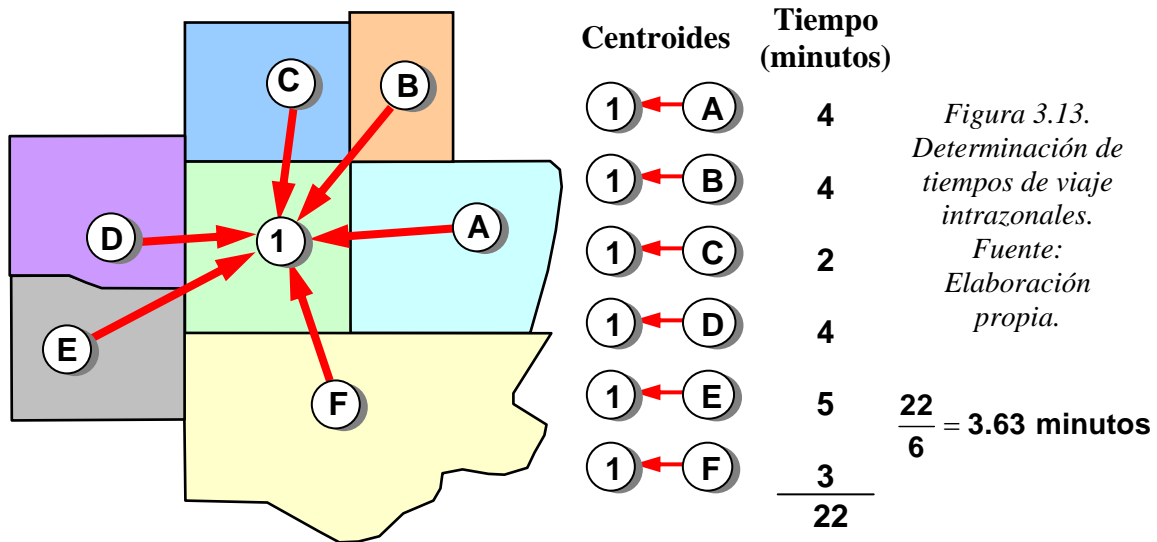


Figura 3.13.
Determinación de tiempos de viaje intrazonales.
Fuente:
Elaboración propia.

Este indicador de accesibilidad se expresa matemáticamente con la siguiente ecuación:

$$TM = \sum \frac{t_{ij}}{N}$$

Donde: t_{ij} es el tiempo de conducción desde un centroide subzonal al centroide principal de la zona.
N es el número de centroides que conforman las subzonas.

Estructura matricial del modelo gravitacional

La figura 3.14 muestra un sistema con los centroides de tres zonas (A, B y C). En la parte izquierda de la figura se esquematizan los pesos (W) y los flujos (F) existentes de los centroides. A la derecha de la figura se muestran las impedancias entre cada par origen-destino. Puesto que la cantidad de variables necesarias para modelar crece conforme aumenta el número de elementos en el sistema, los datos de entrada del modelo deben ser ordenados en forma *matricial*.

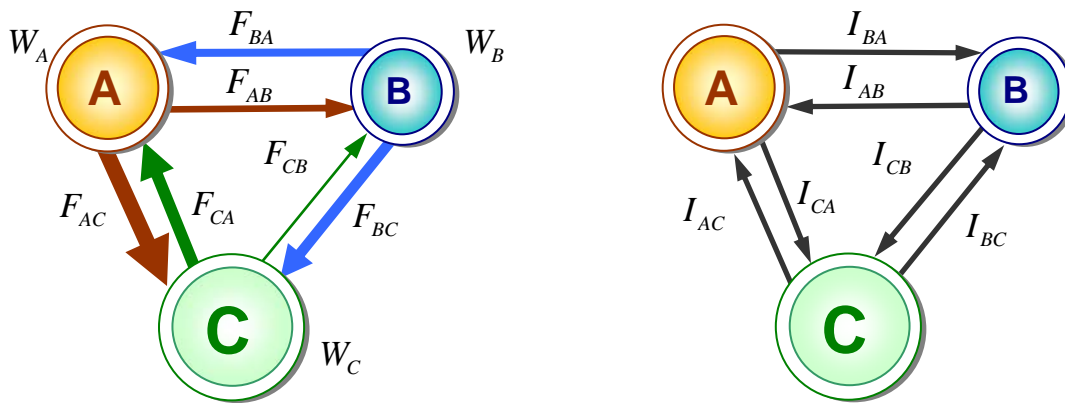


Figura 3.14 Esquema conceptual de algunas variables de interacción para utilizar el modelo gravitacional en un sistema con tres zonas. Fuente: elaboración propia.

Las variables correspondientes a cada interacción en un sistema espacial pueden representarse como una celda en una matriz, en donde las filas se refieren a los centroides de origen y las columnas se refieren a los de destino. Dicha matriz es comúnmente conocida como *matriz origen-destino* (o simplemente *matriz OD*). Los factores de resistencia al viaje también pueden organizarse en las llamadas *matrices de impedancia* (que refleje la distancia, tiempos o costo de los viajes entre los centroides de zonas).

La estructura general de una matriz que contenga flujos o impedancias para utilizar el modelo gravitacional esta mostrada en la siguiente tabla (3.2).

Matriz O/D

Pares O/D		Destinos (j)			
		A	B	C	Total (T _i)
Orígenes (i)	A	$F_{A,A}$	$F_{A,B}$	$F_{A,C}$	$TA_i = (F_{A,A} + F_{A,B} + F_{A,C})$
	B	$F_{B,A}$	$F_{B,B}$	$F_{B,C}$	$TB_i = (F_{B,A} + F_{B,B} + F_{B,C})$
	C	$F_{C,A}$	$F_{C,B}$	$F_{C,C}$	$TC_i = (F_{C,A} + F_{C,B} + F_{C,C})$
	Total (T _j)	$TA_j = (F_{A,A} + F_{B,A} + F_{C,A})$	$TB_j = (F_{A,B} + F_{B,B} + F_{C,B})$	$TC_j = (F_{A,C} + F_{B,C} + F_{C,C})$	$Tij : [TA_i + TB_i + TC_i] = [TA_j + TB_j + TC_j]$

Tabla 3.2 Estructura general de una matriz O/D. Fuente: elaboración propia.

En estas matrices, la sumatoria de las filas (T_i) representa el total (de flujos o impedancias) invertido en salidas, mientras que la sumatoria de las columnas (T_j) representa el total (de flujos o impedancias) invertido en entradas para cada localización. Es importante mencionar que la sumatoria de T_i siempre debe ser igual a la sumatoria de T_j . De no ser así, existen movimientos que vienen o salen del sistema considerado.

Obtener las matrices de tipo origen/destino no es sencillo, pues es costoso y consume bastante tiempo. Generalmente los datos no están disponibles o la información se encuentra incompleta. Con el desarrollo económico de las regiones, la implementación de nuevas actividades e infraestructuras de transporte, las interacciones espaciales tienden a cambiar rápidamente y el problema aumenta. Por ejemplo, en un sistema espacial complicado, como sería una región con 100 orígenes y 100 destinos, las matrices OD tienden a ser muy grandes, esto es del orden de 10,000 pares OD (100×100).

La figura 3.15 representa un sistema espacial con los tiempos de desplazamiento entre sus elementos. La matriz de impedancia es armada para los pares OD de cinco localidades (A, B, C, D y E). En ella, el tiempo entre cada par OD se convierte en una celda, asignando un valor de cero cuando no se cuenta con información. Las sumatorias de las impedancias están en la última fila y columna de la matriz.

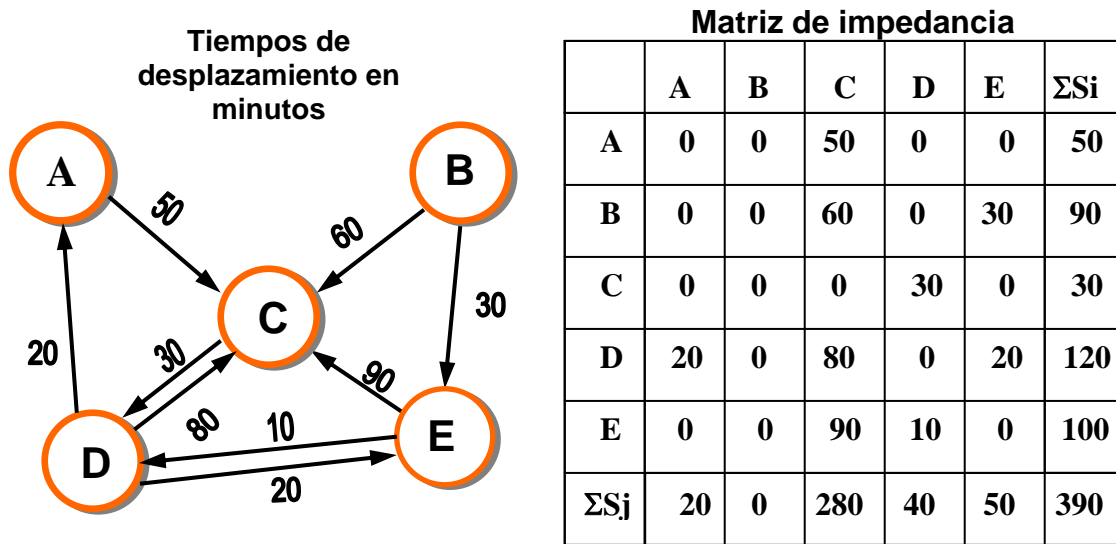


Figura 3.15 Representación matricial de las impedancias de un sistema espacial.
Fuente: elaboración propia.

Para introducir las matrices (ya sea de flujos o de impedancias) en una hoja de cálculo o en un Sistema de Información Geográfica, conviene transformarlas en la estructura mostrada en la tabla siguiente (3.3):

ID Fila	Origen	Destino	Tiempo	Si	Sj
1	A	A	0	50	20
2	A	B	0	50	0
3	A	C	50	50	280
4	A	D	0	50	40
5	A	E	0	50	50
6	B	A	0	90	20
7	B	B	0	90	0
8	B	C	60	90	280
9	B	D	0	90	40
10	B	E	30	90	50
11	C	A	0	30	20
12	C	B	0	30	0
13	C	C	0	30	280
14	C	D	30	30	40
15	C	E	0	30	50
16	D	A	20	120	20
17	D	B	0	120	0
18	D	C	80	120	280
19	D	D	0	120	40
20	D	E	20	120	50
21	E	A	0	100	20
22	E	B	0	100	0
23	E	C	90	100	280
24	E	D	10	100	40
25	E	E	0	100	50

Tabla 3.3
Estructura de la matriz OD de la figura 3.15 para el uso de hoja de cálculo electrónica.

Fuente: elaboración propia.

$$\sum S_{ij} \quad 390 \quad 390$$

La información se ordena de esta manera con el fin que cada registro de la tabla proporcione exclusivamente los datos de un par OD. Esto permite agregar en cualquier momento nuevos campos que contengan las variables requeridas para realizar la modelación, como las masas de los orígenes y destinos o los factores de calibración para cada par. Además se vence la limitación de la mayoría de los programas comerciales respecto al número de columnas máximas admitidas. Los campos I_i e I_j son el resultado de la sumatoria de las impedancias de los orígenes y los destinos respectivamente. Además en la parte inferior de la tabla se encuentran las sumas totales. Estos datos son valiosos para utilizar el modelo gravitacional de probabilidad de interacción.

Formalizando matemáticamente lo anterior, se tiene que el total de interacciones que se producen en un área de estudio distribuida en n zonas, entre la zona i y todas las zonas j se representa:

$$\sum_{j=1}^n T_{ij} = \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{V_i W_j}{S_{i,j}^b}$$

Se mencionará la ecuación de aquí en adelante como *modelo gravitacional convencional*. La ecuación anterior gráficamente se conceptualiza en las figuras 3.16 y 3.17:

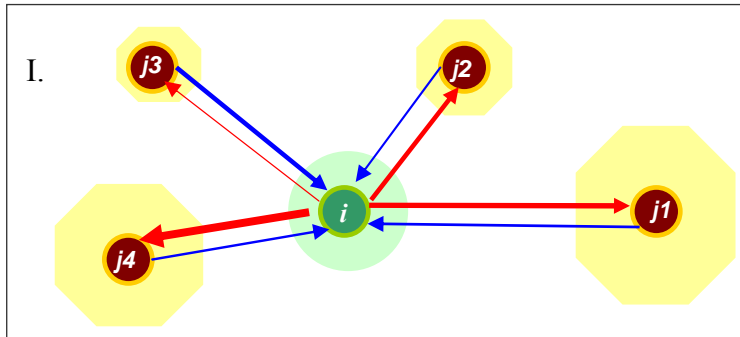


Figura 3.16 Total de interacciones entre la zona i y todas las zonas j .
Fuente: elaboración propia.

De igual forma, para obtener la interacción de cada uno de los elementos j del sistema representado en la figura anterior, se tienen las siguientes interacciones:

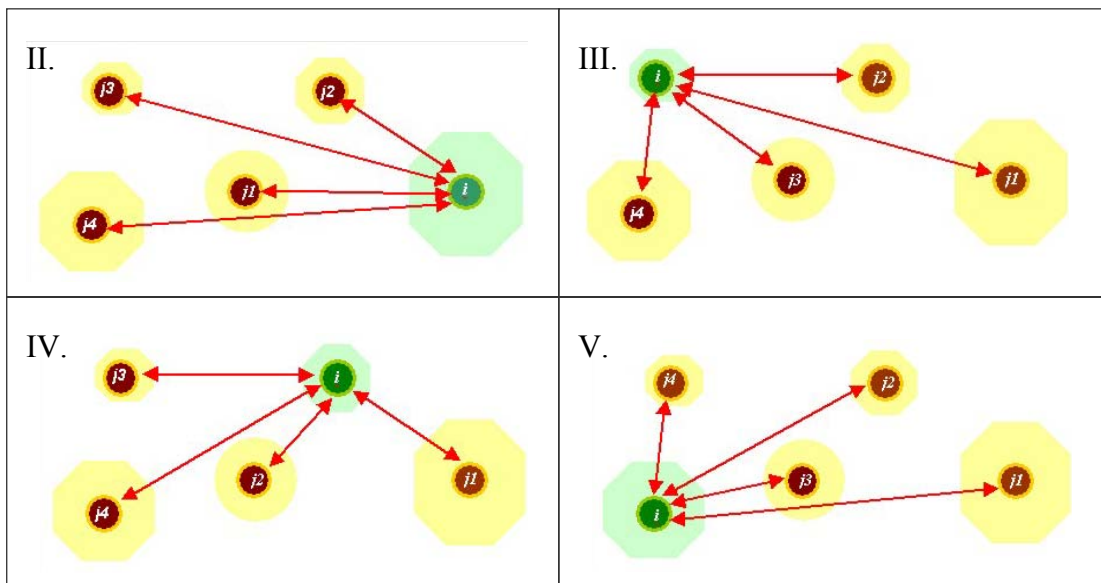


Figura 3.17 Pares origen-destino que interactúan en la figura 3.16.
Fuente: elaboración propia.

Modelos gravitacionales de probabilidad de interacción.

Como se mencionó en el capítulo anterior, Huff es pionero desarrollador de técnicas en el análisis espacial, introdujo notablemente en 1963 el llamado modelo de Huff en el artículo “Análisis Probabilístico de Áreas de Comercio”. Desde entonces, el modelo ha sido utilizado en la predicción del comportamiento espacial de los consumidores, la delimitación de áreas de mercado, la localización de comercios y servicios, análisis de mercados, simulación de escenarios diversos de mercado y el pronóstico de ventas. Recientemente Huff (2003) revisó esta formulación en el contexto de su aplicación con los Sistemas de Información Geográfica. El modelo de Huff ha resistido el paso del tiempo –más de 40

años, su uso es extenso entre los analistas de negocios, gobierno y académicos. Su longevidad se atribuye a su comprensibilidad, relativo fácil uso y su amplio rango de aplicabilidad en problemas diversos. Es conceptualmente lógico y sus salidas pueden entenderse y comunicarse fácilmente, es operacional debido a que los cálculos necesarios son directos una vez que los valores de las variables y los parámetros han sido especificados. Sin embargo, a pesar de la aplicabilidad general del modelo, no siempre ha sido empleado correctamente y su capacidad máxima aún no se ha observado. Después de la revisión rápida del modelo, se tratarán estos dos temas.

El modelo está basado en la premisa de que la probabilidad de que una persona, confrontada ante un conjunto de alternativas seleccione un objeto en particular es directamente proporcional a la utilidad percibida de cada alternativa, por lo que el comportamiento de elección puede considerarse como probabilístico. Consecuentemente, es inverosímil que cualquier alternativa dada sea seleccionada en forma exclusiva a menos que no existan otras alternativas. La probabilidad de que un individuo (i) seleccione la alternativa (j) dada la utilidad de la alternativa j es relativa a la suma de las utilidades de las otras alternativas (n) consideradas por el individuo (i). Para poder aplicar este modelo, la utilidad de cada alternativa debe definirse empíricamente. Esta proposición puede expresarse como se muestra en la ecuación.

$$P_{ij} = \frac{U_j}{\sum_{j=1}^n U_j}$$

La primera aplicación espacial del modelo fue una aproximación para predecir patrones de preferencia de los consumidores para diferentes clases de productos. La utilidad de una tienda era definida como el índice de los metros cuadrados de área de venta entre la distancia del hogar del consumidor hasta la tienda. Cada una de estas variables era calibrada por un exponente (o parámetro) estimado empíricamente mediante encuestas de preferencias de compra de los individuos pertenecientes a la zona en estudio. En este estudio fue postulado que el tamaño de la tienda era más importante para algunos productos, en consecuencia, el valor del exponente de calibración debería ser mayor para estos. Inversamente, el exponente utilizado para calibrar la distancia podía ser de valor negativo. Los productos de conveniencia deberían tener exponentes mayores que los productos especializados. La probabilidad de que un consumidor en el lugar i seleccione la tienda j puede estimarse utilizando la fórmula siguiente.

$$P_{ij} = \frac{S_j^\alpha D_{ij}^\beta}{\sum_{j=1}^n S_j^\alpha D_{ij}^\beta}$$

En esta fórmula, P_{ij} es la probabilidad de que el consumidor localizado en i seleccione la tienda j ; D_{ij} es la distancia desde i hasta j ; los parámetros α y β fueron estimados basándose en datos de una encuesta. Con esta información no solamente las probabilidades de patrocino pueden estimarse, también las expectativas de ventas para las subáreas dentro

de la zona de estudio como se muestra en la siguiente ecuación. Para este escenario, E_{ij} son las ventas esperadas desde el área i hasta la tienda j y B_{ik} es la cantidad presupuestada por los consumidores en i para el producto k .

$$E_{ij} = P_{ij}B_{ik}$$

Los analistas que utilizan el modelo de Huff típicamente incorporan medidas de accesibilidad (por ejemplo, la distancia sobre los caminos, tiempo de viaje, costo) así como la variable que refleje la atracción de un destino dado. Los pesos (como son los parámetros asociadas con esas variables) frecuentemente son asignados en forma arbitraria y raramente se utilizan procedimientos sofisticados para hacerlo. Como resultado, la significación estadística de estas variables se desconoce. Obviamente la falta de validación estadística de las variables y de los parámetros puede producir significados erróneos.

Esta extensión del modelo clásico gravitacional considera que el total de las interacciones que ocurren entre todas las zonas pertenecientes al sistema influyen sobre la zona de origen i , es decir, es una forma de obtener valores globales de la interacción de cada elemento. Con este método se logra jerarquizar las localizaciones. A continuación se muestra la expresión matemática que representa este comportamiento:

$$T_{ij} = \frac{\left(K_{ij} \frac{V_i W_j}{S_{i,j}^b} \right)}{\left[\left(K_{i,j} \right) \left(\frac{V_i W_j}{S_{i,j}^b} \right) + \left(K_{i+1,j+1} \right) \left(\frac{V_{i+1} W_{j+1}}{S_{i+1,j+1}^b} \right) + \dots + \left(K_{i+n,j+n} \right) \left(\frac{V_{i+n} W_{j+n}}{S_{i+n,j+n}^b} \right) \right]}$$

Simplificando la ecuación anterior queda:

$$T_{ij} = \frac{K_{ij} \frac{V_i W_j}{S_{i,j}^b}}{\sum_{i,j=1}^n K_{ij} \frac{V_i W_j}{S_{i,j}^b}}$$

El cociente representa la probabilidad de interacción entre las zonas i y j , dada la atracción existente entre las demás zonas. Esta segunda extensión al modelo, permite realizar análisis diversos, como por ejemplo el cálculo de la influencia relativa de cada elemento en un sistema y cómo se verán afectadas estas relaciones en caso de agregar elementos nuevos y el tamaño de la interacción de esta nueva ubicación.⁵ En las figuras siguientes (3.18 y 3.19) se muestran 2 representaciones típicas de estos resultados.

⁵ Vea “Teoría de localización” en el capítulo 1

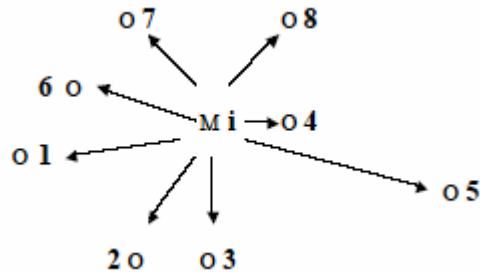


Figura 3.18 Representación del problema de la elección espacial en forma de grafo. Fuente: A.S. Fotheringham y M.E. O'Kelly, 1989.

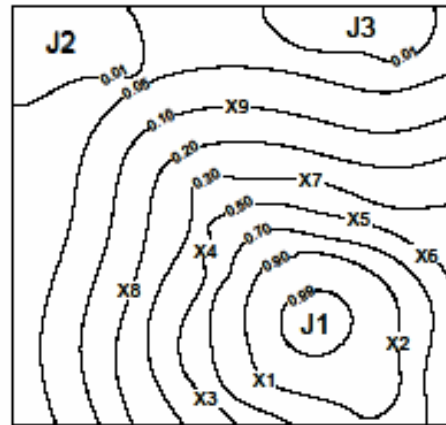


Figura 3.19 Resultados del modelo de Huff mediante contornos de isoprobabilidades obtenidos mediante un proceso de interpolación. Fuente: el autor.

Como puede observarse en la figura 3.18, la representación de la probabilidad de interacción mediante grafos, proporciona un resultado muy similar al de los modelos de potenciales. Si se utilizan los contornos de isoprobabilidades para este mismo fin (figura 3.19), se obtienen los patrones de distribución espacial del índice de interacción en un sistema.

Interpolación de superficies

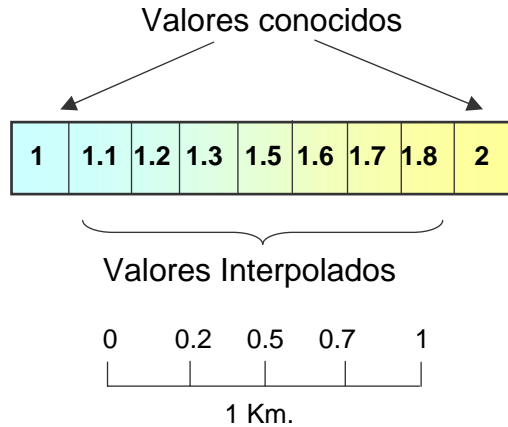
Profundizando, la interpolación es un procedimiento utilizado para predecir los valores de localizaciones donde se carece información de puntos de muestreo. Se basa en el principio de *correlación*⁶ espacial, que mide el grado de relación/dependencia entre objetos cercanos y distantes. La autocorrelación espacial determina si los valores están correlacionados y si existe algún patrón espacial. Esta correlación es usada para medir: similitud de objetos dentro de un área, el grado con el cual un fenómeno espacial se correlaciona a sí mismo en el espacio, el nivel de interdependencia entre las variables y la naturaleza y fuerza de la interdependencia.

⁶ Vinculación de una variable consigo misma, cuando las observaciones son consideradas con una diferencia en el tiempo (correlación temporal) o en el espacio (correlación espacial). Si la presencia de una cualidad en una parte de un territorio torna su presencia en las zonas vecinas más o menos probable, existe un efecto de contigüidad en la estructura espacial, y en tal caso el fenómeno muestra una correlación espacial. La correlación es positiva cuando las regiones vecinas tienden a tener propiedades idénticas o de valores semejantes (ejemplo: regiones homogéneas, gradientes regulares); la correlación es negativa cuando las regiones vecinas tienen cualidades diferentes, o bien alternan los valores fuertes con los débiles. Las medidas de correlación dependen de la escala de análisis, del nivel de resolución de la malla a través de la cual una distribución es observada. Estas medidas son relaciones entre la covarianza medida por un paso dado y la varianza total. Fuente: ESRI.

Diferentes métodos de interpolación casi siempre producen diferentes resultados.

La interpolación espacial es el procedimiento utilizado para predecir valores de unidades territoriales para localizaciones donde se carece de puntos muestrales.

Figura 3.20 A partir de valores muestrales dados, los métodos de interpolación espacial permiten obtener los valores intermedios.
Fuente: ESRI.



Las características de una superficie interpolada pueden controlarse al limitar los puntos de entrada utilizados en el cálculo de los valores de salida de las celdas (figura 3.21) Esto puede hacerse limitando el número de puntos muestreados o el área a partir de la cual los puntos muestreados son tomados. Especificando el número máximo de puntos a ser muestreados devolverá los puntos más cercanos a la localización de la celda de salida hasta que el número máximo sea alcanzado. Alternativamente, al especificar un radio fijo en las unidades del mapa seleccionará únicamente los puntos de entrada dentro de la distancia radial a partir del centro de las celdas de salida hasta que no existan suficientes puntos dentro de ese radio.

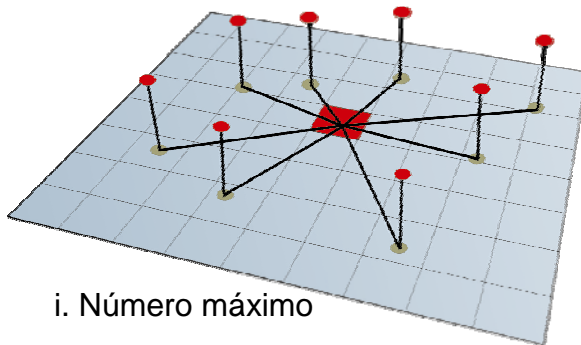
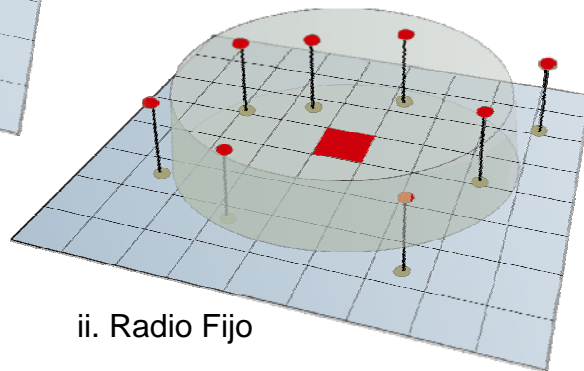


Figura 3.21 Control de los puntos en la interpolación.
Fuente: ESRI.



Existen dos categorías para las técnicas de interpolación: determinísticas y geoestadísticas. Las técnicas de interpolación determinísticas crean superficies basadas en puntos medidos o fórmulas matemáticas. Métodos como el IDW (Inverse Distance Weight), llamado en español Distancia Inversa Ponderada, se basa en el grado de similitud de las celdas, mientras que métodos como el de tendencias (Trend) ajustan una

superficie suavemente mediante una función matemática. Las técnicas de interpolación geostatísticas, como el Kriging, se basan en la estadística, y son utilizadas para modelar mediante una predicción más avanzada ya que incluye medidas sobre certeza o precisión de las predicciones.

Las barreras (figura 3.22) también controlan la manera en que las superficies son generadas pues reflejan la presencia de discontinuidades, colinas, corrientes y otras características que crean discontinuidades lineales en las superficies. IDW y Kriging soportan el uso de las barreras.

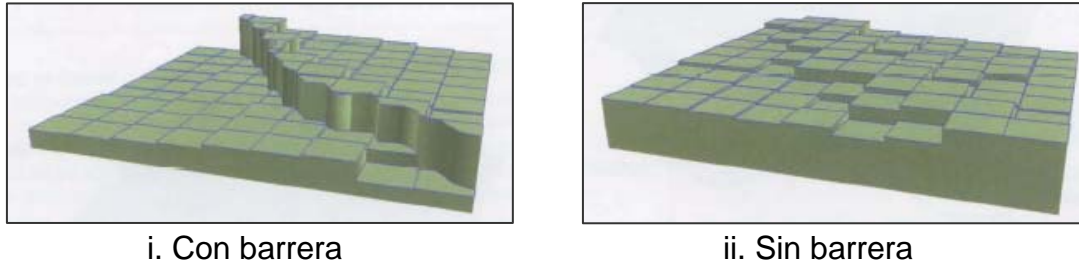


Figura 3.22 Diferencias en la interpolación al considerar o no barreras.
Fuente: ESRI

Varias herramientas de interpolación incorporan las barreras que definen y controlan el comportamiento de la superficie en términos de suavidad y continuidad. Las barreras son necesarias debido a que algunas veces las operaciones de interpolación no deberían ser realizadas a través de características, como fallas, diques, montañas y flujos de agua, que crean discontinuidades lineales en la superficie. Al usar las barreras, cambios en el comportamiento de la superficie pueden ser descritos y llevados a cabo.

Opciones de interpolación disponibles en los SIG

El método más apropiado depende de la distribución de los puntos de muestreo y del fenómeno en estudio.

IDW. Se recomienda utilizar la función IDW cuando un grupo de puntos es lo suficientemente denso como para capturar el grado de variación local de la superficie necesario para el análisis. IDW determina los valores de las celdas utilizando una combinación lineal ponderada de un juego de puntos muestrales. La ponderación asignada esta en función de la distancia de un punto de entrada a la localización de una celda de salida. Mientras mayor sea la distancia, menor será la influencia que la celda tiene sobre el valor de salida.

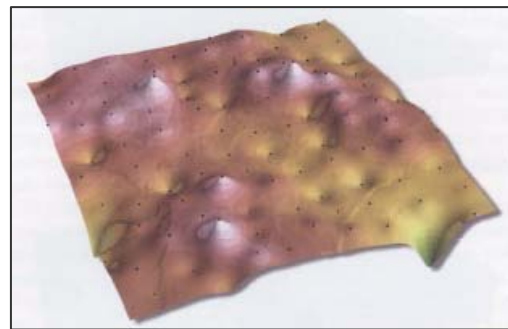


Fig. 3.23 Superficie interpolada mediante el método IDW.
Fuente: ESRI

Spline. Estima los valores utilizando una función matemática que minimiza la curvatura superficial total. Esto resulta en una superficie suavizada que pasa exactamente a través de los puntos de entrada. Conceptualmente, esto es como doblar una hoja o caucho de manera que pase a través de los puntos, minimizando la curvatura total de la superficie. Puede ayudar a predecir cantos y valles en los datos y es el mejor método para representar superficies de fenómenos que varían suavemente como la temperatura.

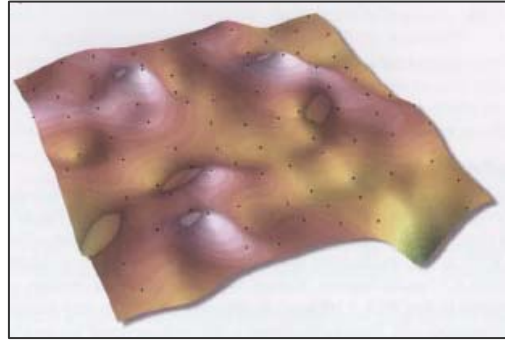


Fig. 3.24 Superficie interpolada mediante el método Spline. Fuente: ESRI

Existen dos variaciones del spline: regularizado y tensión. Un spline regularizado incorpora la primera derivada (pendiente), segunda derivada (índice de cambio en la pendiente), y la tercera derivada (índice de cambio en la segunda derivada) en sus cálculos de la minimización. Aunque un spline de tensión usa únicamente la primera y segunda derivadas, este incluye más puntos en los cálculos spline, los cuales usualmente crean superficies más suaves, pero incrementan el tiempo de cómputo.

Kriging. Es un método poderoso de interpolación estadística usado en diversas aplicaciones, como las ciencias de la salud, geoquímica y modelación de la contaminación ambiental. El kriging asume que la distancia o dirección entre los puntos de la muestra refleja una correlación espacial que puede ser usada para explicar la variación en la superficie. Ajusta una función a un número específico de puntos (ya sean vecinos cercanos o los contenidos dentro de un radio específico) para determinar el valor de salida en cada localización. El kriging es el método más apropiado cuando una distancia espacialmente correlacionada o un sesgo en los datos es conocido y frecuentemente es utilizado en aplicaciones geológicas y geotécnicas. Los valores predichos son derivados de la medición de las relaciones en muestras utilizando una técnica sofisticada de promedios ponderados, utiliza un radio de búsqueda que puede ser fijo o variable. Los valores de celda generados pueden exceder el rango de valores de las muestras y la superficie no pasa a través de las muestras. Existen diversos tipos de kriging, el método más común es el kriging ordinario, que asume que no existe media constante para los datos sobre el área media (por ejemplo, no hay tendencia). El kriging universal asume que existe una tendencia de eliminación y que esta puede modelarse.

En el siguiente capítulo se utilizará la interpolación como un componente en la modelación de la probabilidad de interacciones, por esta razón consideré pertinente hacer este paréntesis técnico. A continuación se explicará un ejemplo de aplicación del modelo de probabilidad de interacción para dejar claro este concepto.

Ejemplo de aplicación No. 5.

Obtención del índice gravitacional para un sistema espacial de cuatro centroides.

Se analizan cuatro centroides: “i” con una población de 20 mil habitantes, “x” con 30 mil, “y” con 25 mil, y “z” con 15 mil. Se cuenta también con una matriz de impedancia (separación espacial) entre estas localidades, con unidades en horas que a continuación se muestra.

Tabla 3.4 Matriz de separación espacial del ejemplo de aplicación.
Fuente: Elaboración propia.

	<i>i</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
<i>i</i>	0	3	2	5
<i>x</i>	3	0	10	6
<i>y</i>	2	10	0	8
<i>z</i>	5	6	8	0

Para obtener el índice gravitacional de cada unidad del sistema, lo primero es generar un diagrama conceptual que esquematice los datos:

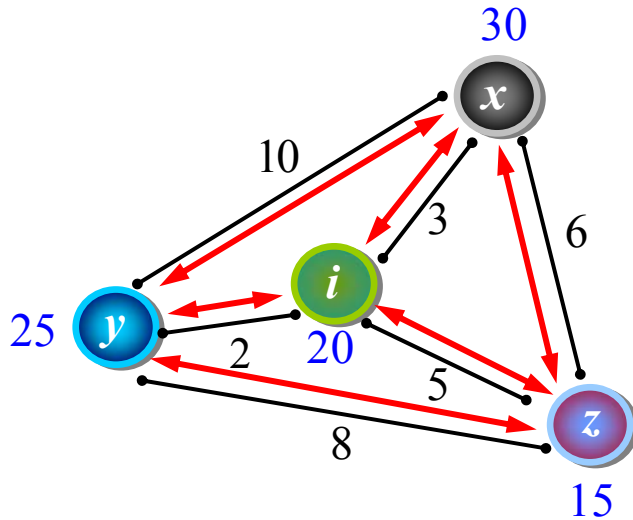
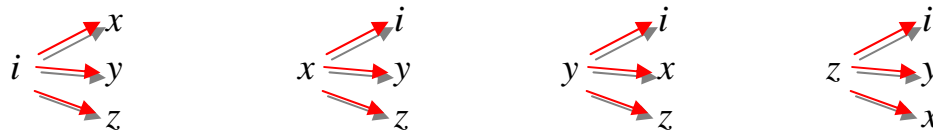


Figura 3.25
Conceptualización del ejemplo. Se incluyen las masas y los valores de separación de todos los elementos.
Fuente: elaboración propia

El siguiente paso es identificar los pares origen – destino disponibles. Es posible que en un sistema no existan todas las relaciones o-d posibles, esto debido a falta de vías de comunicación o la presencia de barreras. Para este ejemplo, las relaciones halladas son:



Ya con la información ordenada, se aplica la fórmula básica del modelo, para este ejemplo se considerará que la constante de calibración k es igual a 1 y que no hay exponente de fricción espacial b .

$$T_{ij} \% = \frac{\frac{V_i W_j}{S_{i,j}^b}}{\sum_{i,j=1}^n K_{ij} \frac{V_i W_j}{S_{i,j}^b}}$$

3. EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS EN EL TRANSPORTE

La tabla 3.5 muestra el análisis de interacción generado a partir de la información del problema de ejemplo. Cada par origen-destino es calculado con el numerador de la fórmula, que corresponde a la columna T_{ij} . El denominador pueden ser los subtotales por origen o por el total del sistema.

ANÁLISIS DE INTERACCIÓN GRAVITACIONAL

origen	par o-d	separación	masa origen	masa destino	T_{ij}	ΣT_{ij}	$T_{ij} \% subtotal$	$T_{ij} \% total$
i	i-x	3	20	30	200.00	510.00	39.22%	36.15%
	i-y	2		25	250.00		49.02%	
	i-z	5		15	60.00		11.76%	
						subtotal:	100.00%	
x	x-i	3	30	20	200.00	350.00	57.14%	24.81%
	x-y	10		25	75.00		21.43%	
	x-z	6		15	75.00		21.43%	
						subtotal:	100.00%	
y	y-i	2	25	20	250.00	371.88	67.23%	26.36%
	y-x	10		30	75.00		20.17%	
	y-z	8		15	46.88		12.61%	
						subtotal:	100.00%	
z	z-i	5	15	20	60.00	178.75	33.57%	12.67%
	z-x	8		30	56.25		31.47%	
	z-y	6		25	62.50		34.97%	
						subtotal:	100.00%	
					total:	1,410.63	total:	100%

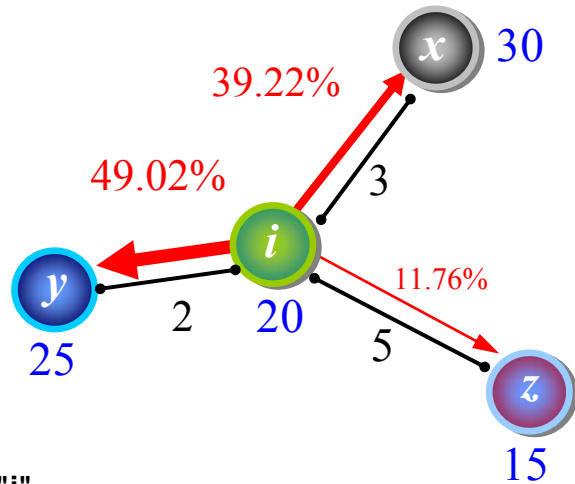
Tabla 3.5 Cálculo del índice de interacción gravitacional del ejemplo presentado. La organización tabular de los datos permite la realización del análisis en forma estructurada.
Fuente: elaboración propia.

Descripción de los campos de la Tabla 3.5:

“par o-d”	contiene las relaciones existentes en el sistema,
“separación”	el tiempo en horas entre el par,
“masa de origen”	la población en la localidad de origen,
“masa destino”	la población en la localidad de destino,
“ T_{ij} ”	el índice de interacción calculado para el par correspondiente,
“ ΣT_{ij} ”	contiene la suma parcial del índice para cada origen,
“ $T_{ij} \% subtotal$ ”	muestra en forma porcentual la aportación de cada par al subtotal por origen y
“ $T_{ij} \% total$ ”	contiene en forma porcentual la aportación de cada origen al sistema completo.

Representar los resultados en forma de grafos permite hacer las siguientes conclusiones:

1) “i” mantiene una estrecha relación con la localidad “y” debido a la cercanía y al tamaño de sus masas, según el análisis el 49% del total de interacciones en este subsistema, se realizan con esta localidad. En segundo lugar se encuentra la interacción con la localidad “x” y por consiguiente, la relación entre “i” y “z” es la más débil, debido a la lejanía y a la magnitud de sus masas.



INTERACCIÓN DEL ORIGEN "i"

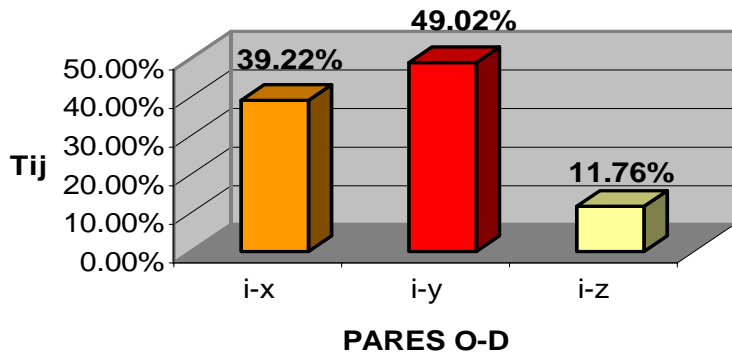


Figura 3.26 Jerarquía de la interacción del subsistema con origen en “i”.
Fuente: Elaboración propia.

2) El resultado obtenido para el subsistema con origen en x tiene un comportamiento diferente (Fig. 3.27-I, II), se aprecia que la relación “x-i” es la más fuerte (del orden de más de la mitad del total: 57%), mientras que la relación con “y” y “z” es de magnitud equivalente. La razón es la proporción de las masas y su separación. Una interpretación de este resultado es que existe una clara preferencia a viajar hacia “i” desde el origen “x”, mientras que viajar hacia “y” o “z” es indiferente, por lo que entre ellas existe una relación de competencia equitativa.

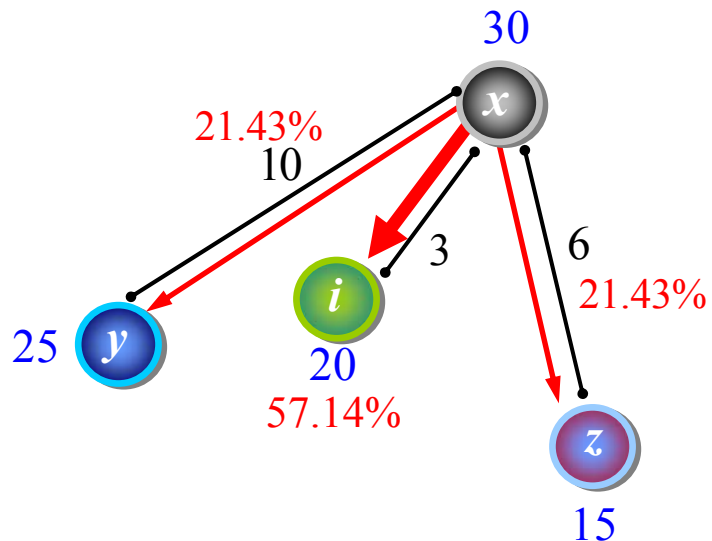


Figura 3.27-I Jerarquía de la interacción del subsistema con origen en “x”. Fuente: elaboración propia

INTERACCIÓN DEL ORIGEN "x"

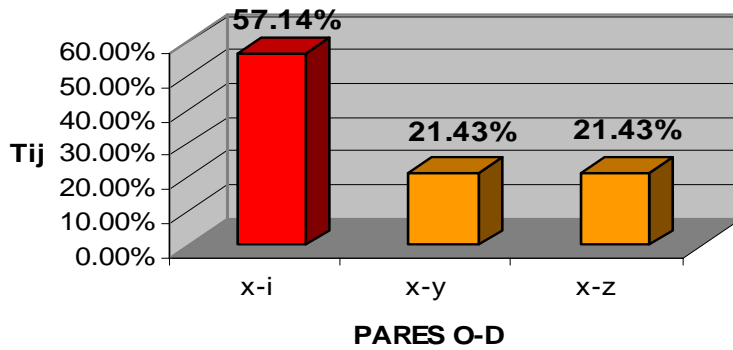


Figura 3.27-II Jerarquía de la interacción del subsistema con origen en "x". Fuente: elaboración propia

3) La interacción del subsistema "y" tiene otro desempeño. La relación "y-i" es la más fuerte (67.23%), En segundo lugar se encuentra "y-x" con 20.17% pese a que existe mayor separación que "y-z". En este caso la magnitud de las masas hace la diferencia. La figura 3.28-II muestra la magnitud con que interactúan los centroides de este subsistema.

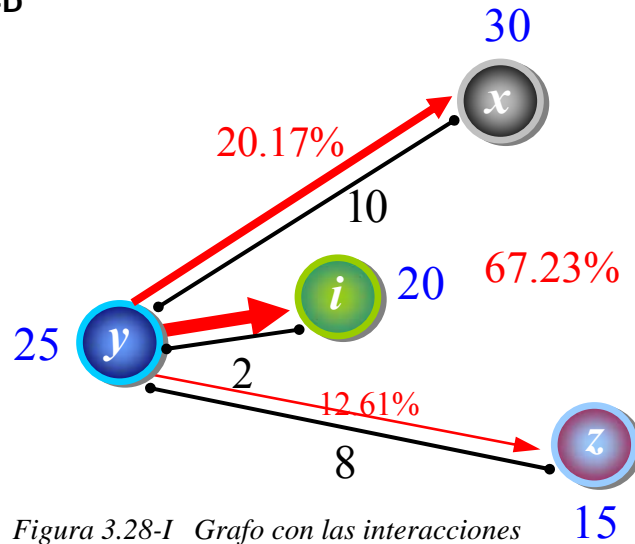


Figura 3.28-I Grafo con las interacciones del centroide y. Fuente: elaboración propia.

INTERACCIÓN DEL ORIGEN "y"

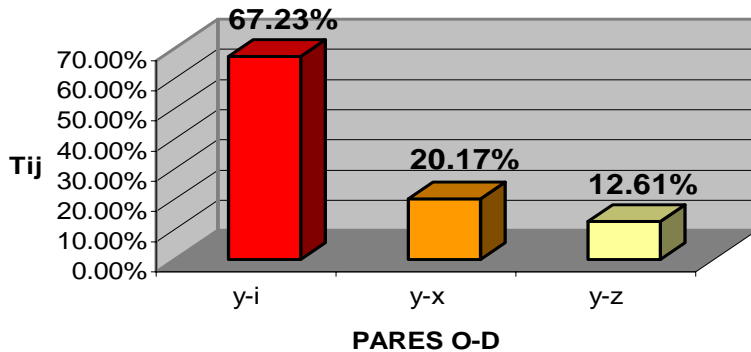
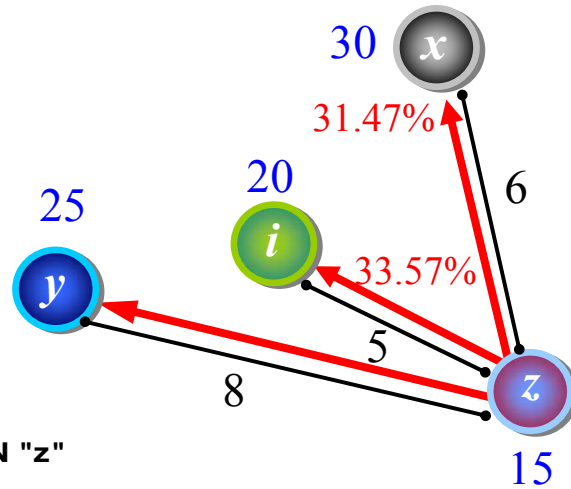


Figura 3.28-II Jerarquía de la interacción del subsistema con origen en "y". Fuente: elaboración propia.

4) Las relaciones del subsistema "z" son equilibradas, pues todas son del orden del 30%. Esto significa que no existe una preferencia marcada por interactuar con algún elemento en particular.



INTERACCIÓN DEL ORIGEN "z"

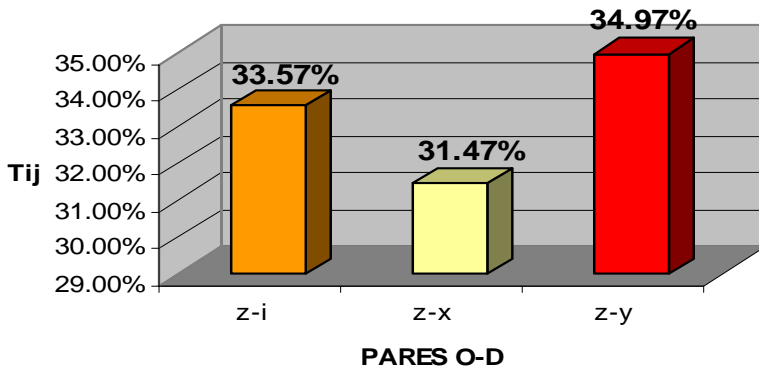


Figura 3.29 Las tres relaciones de este subsistema (z) prácticamente son equivalentes. Fuente: elaboración propia.

La distribución total de las interacciones a partir de los diversos orígenes se presenta a continuación:

Total de Interacciones en el sistema

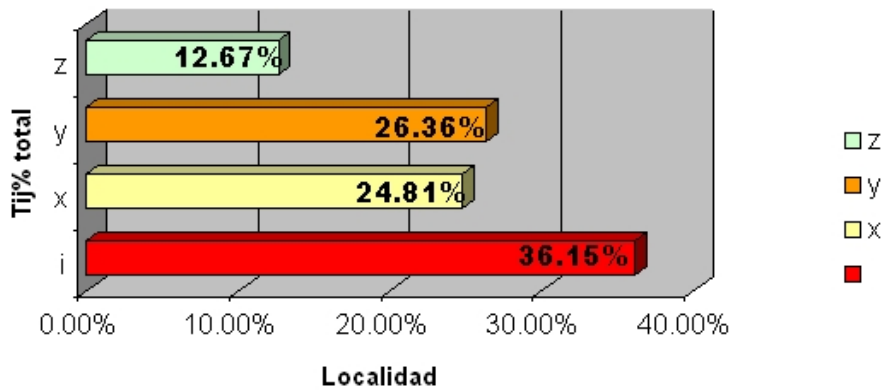


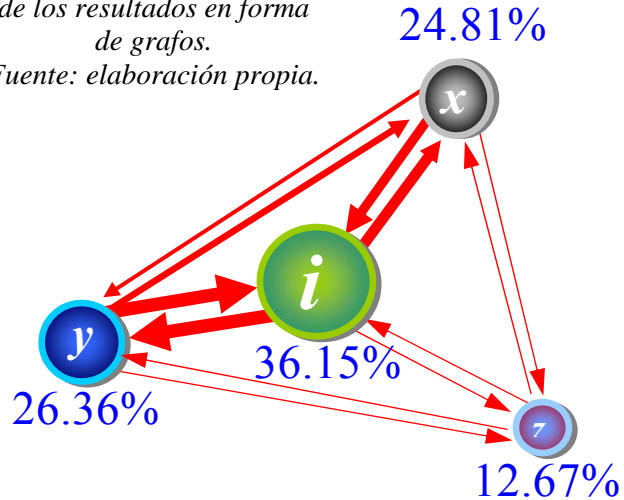
Figura 3.30 Resultados de probabilidad de interacción para la totalidad del sistema. Fuente: elaboración propia.

La interpretación de la suma total es que el foco de interacciones en el sistema es la localidad "i", aspecto que concuerda plenamente con los análisis de los subsistemas y con la teoría de los lugares centrales expuesta en el primer capítulo. Existe una relación

de equidad entre las localidades “x” y “y” y una relación de exclusión de la localidad “z” con las demás. Cabe destacar que la interacción más fuerte es la del par “i-y”.

La representación de estos resultados utilizando grafos enriquece la interpretación de los mismos a pesar que son una conceptualización elemental del problema en cuestión (vea la figura de la derecha, 3.31). Cuando se realiza la modelación gravitacional de sistemas espaciales con ayuda de la teoría de los grafos, es posible identificar la conformación de los centros de poder, localizaciones en competencia, localizaciones suprimidas y puntos de indiferencia.

Figura 3.31 Representación de los resultados en forma de grafos.
Fuente: elaboración propia.



3.2 Mejoras y variantes al modelo gravitacional

Investigadores y especialistas en diversas áreas han incorporado mejoras y variantes al modelo gravitacional convencional con fines específicos según sus intereses y las necesidades producidas por las problemáticas que encuentran. Esto se ha hecho mediante varias formas: ya sea con artificios matemáticos para el despeje de variables, ajustes estadísticos como los mínimos cuadrados y los análisis de regresión, mejoras conceptuales como la implementación de nuevas variables o con nuevos enfoques y planteamientos, como sería su aplicación para la simulación. A continuación explico algunas de las mejoras al modelo que sirvieron como base para desarrollar la metodología desarrollada en el capítulo 4.

Incorporación de pesos para jerarquizar las variables.

Existen variables que tiene importancia fundamental para definir magnitudes de interacción. Se pueden ponderar las masas del modelo gravitacional al añadir coeficientes ω para representar demandas locales. Al igual que las potencias α , λ y β , estos deben ser calibrados para toda la zona en estudio con el fin de hacer una representación fidedigna del fenómeno en cuestión.

$$T_{ij} = K_{ij} \cdot \frac{\omega_i V_i^\lambda \cdot \omega_j W_j^\alpha}{S_{ij}^\beta}$$

Donde:

- ω_i, ω_j Coeficientes de ponderación respectivos de las localizaciones i y j ,
- λ, α Potencias de las variables masas

Un modelo análogo del potencial puede expresarse con la fórmula:

$$V_i = \sum_{j=1}^n K_{ij} \frac{\omega_j W_j^\alpha}{S_{ij}^\beta}$$

Modelo gravitacional de Kolars y Malin para la simulación de construcción de redes

La simulación no se define cómo un método, sino un modo de aplicar el modelo. Se utiliza para crear o pronosticar una configuración o un proceso a base de una recopilación de datos correspondientes y de las reglas de procedimientos establecidas. La simulación espacial puede definirse de forma amplia como una generación de la historia de un estado o de estados de un modelo espacial, que se trata como historia de una configuración determinada (K. Dramowicz, 1977); en este caso esta configuración es la red de transporte.

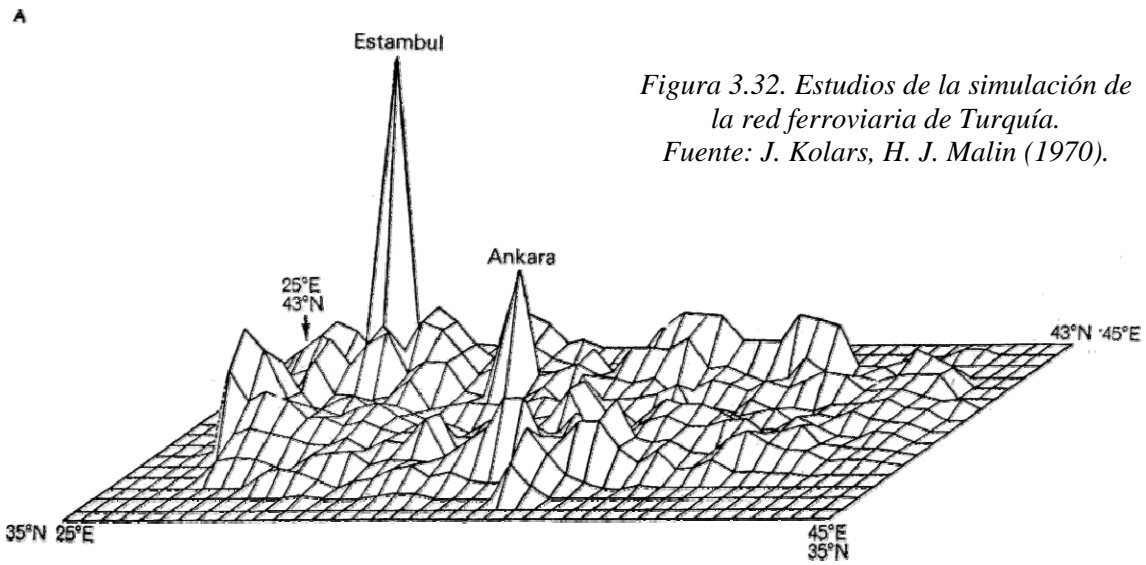
Al respecto Morral (1965) incorpora la red de vías en su modelo basado en la técnica de Monte Carlo. Presume que la probabilidad de la construcción de una nueva vía sobre un área depende de la longitud de las vías existentes, de la cantidad de la población, sobre todo, tratándose de las ciudades, de las características de las áreas que debe atravesar y de los costes de la construcción. Las vías que el autor traza de esta manera corresponden muchas veces a su localización real.

El modelo de Kansky está construido para un área determinada. Concretamente, es un modelo de la red ferroviaria de Sicilia. El autor asume que Sicilia constituye una región funcionalmente cerrada y que la red de las líneas ferroviarias refleja las características regionales de la isla. Así que el orden en que fueron construidas las líneas ferroviarias puede establecerse a base de la distribución de la actividad económica. Para cada concentración de esta actividad existe cierta probabilidad de establecer un enlace con otra concentración por medio de una línea de ferrocarril. Un mayor grado de concentración representa una mayor probabilidad de la construcción de las líneas.

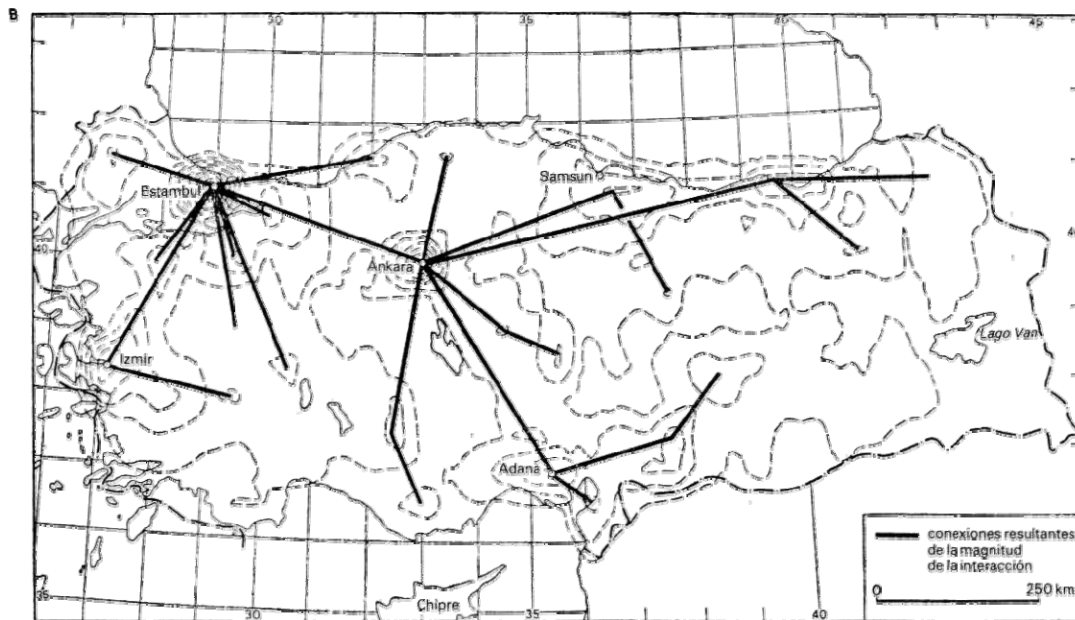
J. Kolars y H. J. Malin (1970) aplican el procedimiento de Kansky, ligeramente modificado, a la simulación de la red ferroviaria de Turquía. El punto de partida es un mapa de la población tridimensional (figura 3.32). Los puntos de las “cimas” del mapa representan ciudades o áreas agrícolas densamente pobladas. La probabilidad de enlace entre dos ciudades es directamente proporcional al número de sus habitantes e inversamente proporcional a la distancia entre ellas.

Este tipo de mapas tridimensionales pueden generarse en un sistema de información geográfica mediante diferentes modelos de datos como las superficies de triángulos irregulares (TIN), o los modelos de elevación (DEM).

3. EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS EN EL TRANSPORTE



El modo de actuar se compone de varias etapas. Al principio se unen todas las “cimas” del mapa tridimensional trazando una línea recta entre la “cima” más baja y las más alta, para la que la interacción calculada con ayuda del modelo gravitacional tiene el valor más elevado. Este procedimiento se repite hasta que se agoten todas las posibilidades (figura 3.33).



Luego se suprimen las líneas paralelas (figura 3.34), mientras los segmentos cortos, como ineficaces, se unen con su vecino más próximo, independientemente del valor del índice de interacción (figura 3.35).

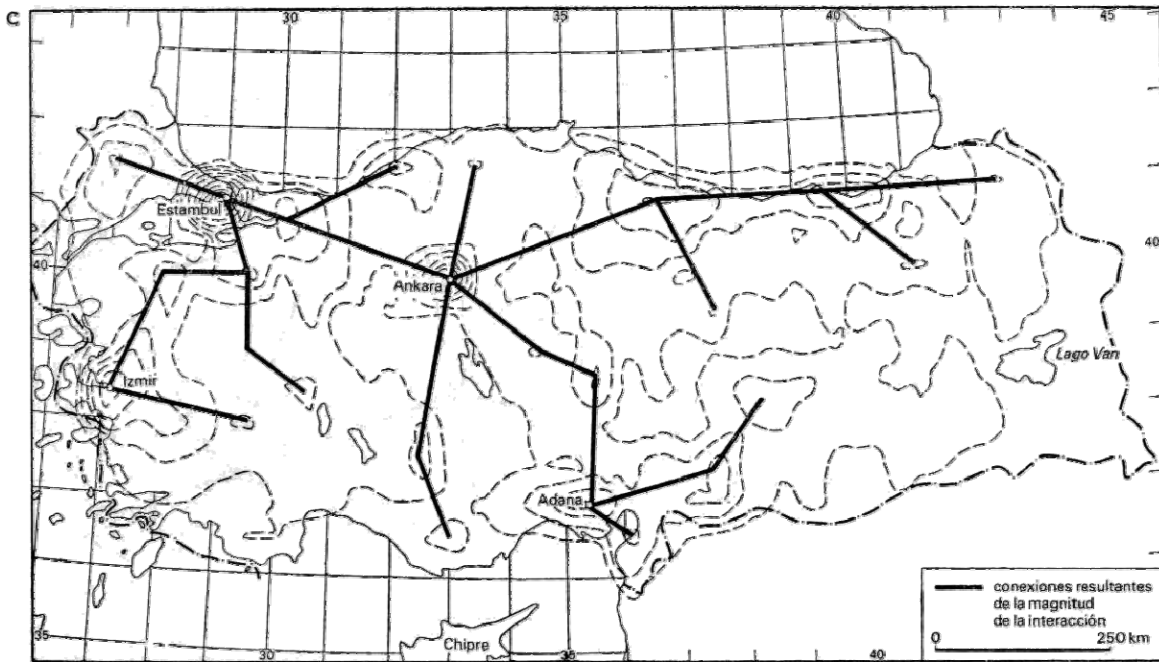


Figura 3.34 Supresión de líneas paralelas entre cimas. Fuente: J. Kolars, H. J. Malin (1970).

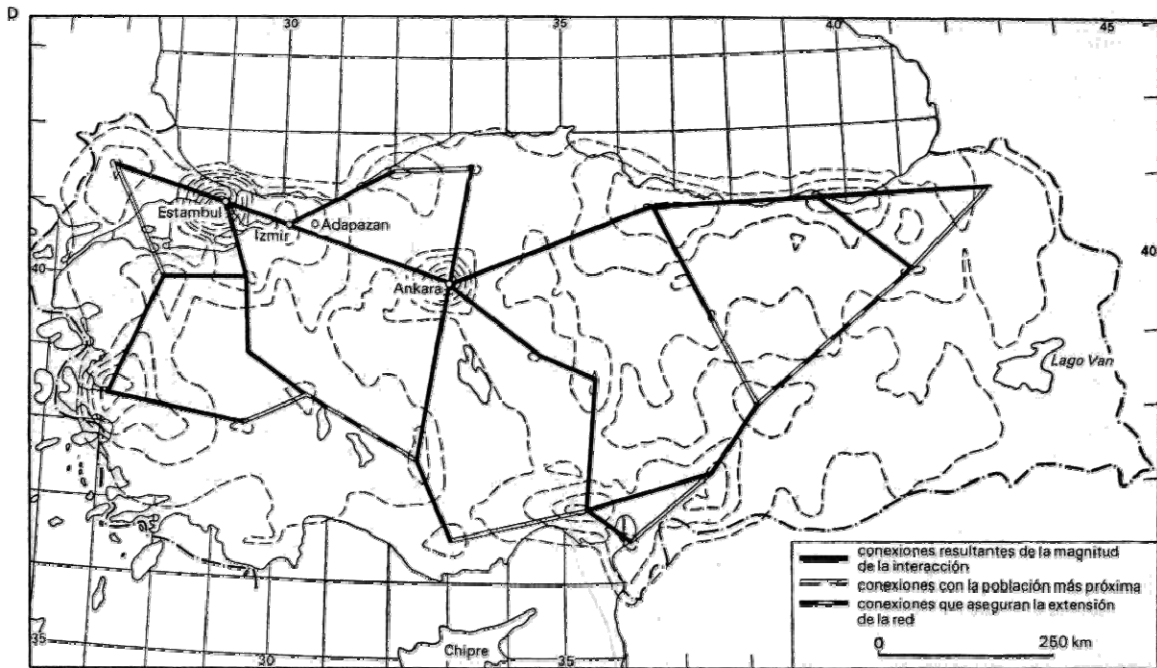


Figura 3.35 Conformación de circuitos mediante la unión de los segmentos más cortos con su vecino más cercano. Fuente: J. Kolars, H. J. Malin (1970).

Así queda conformada una red con: dos circuitos situados en la parte occidental y la oriental del país, y de dos circuitos de la parte central que convergen en la capital (figura 3.35). Posteriormente, las líneas rectas se sustituyen por curvas con el fin de ajustar la red a las condiciones naturales del área: el relieve del terreno, a la línea del litoral (figura 3.36).

3. EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS EN EL TRANSPORTE

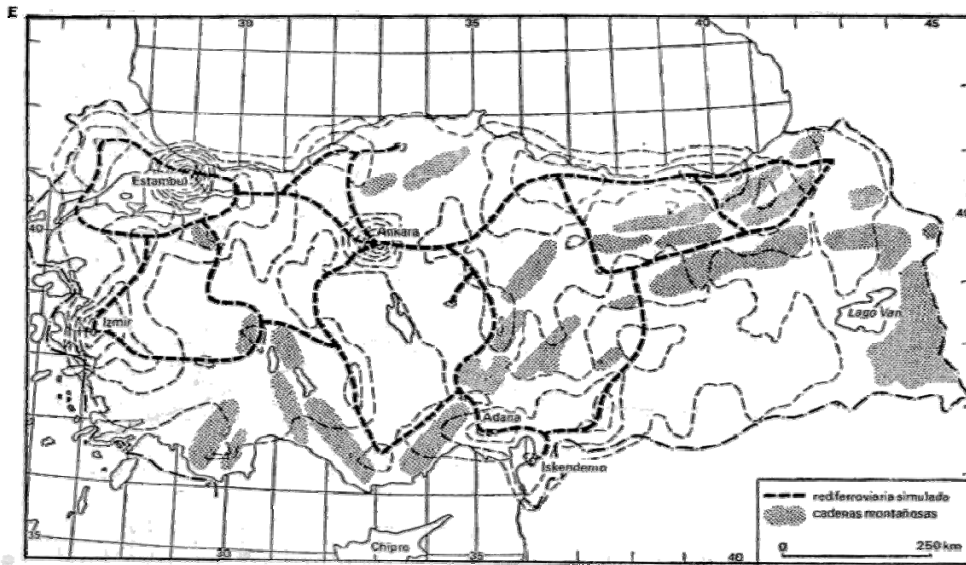


Fig. 3.36
Red ajustada
a las
condiciones
naturales del
área: relieve
y litoral.
Fuente: J.
Kolars, H. J.
Malin (1970).

El grado de coincidencia entre la red obtenida como resultado de la aplicación de la simulación y la red real puede verse en la figura 3.37 a continuación.

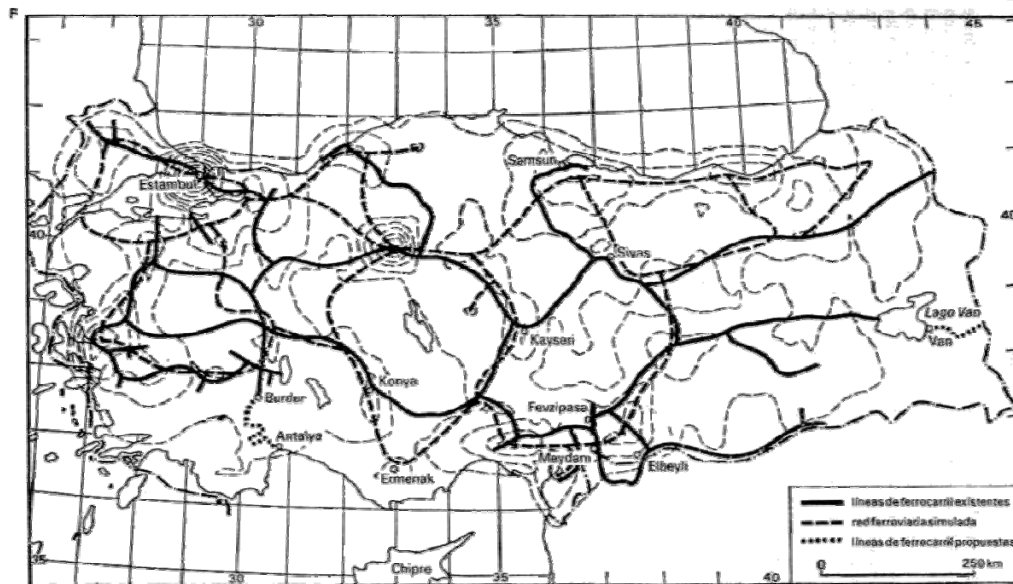


Figura 3.37 Grado de coincidencia entre la red real (línea continua) y la simulada (línea punteada). Fuente: J. Kolars, H. J. Malin (1970).

Los modelos descritos tienen ciertos defectos derivados del modo de elegir las variables independientes y dependientes. Como observa con razón A. Hay (1973, p.79) en el estudio de Kansky los datos sobre el nivel de desarrollo económico se refieren al año 1908 y no al período de la construcción del ferrocarril. Kolars y Malin, a su vez, utilizan los datos sobre la densidad de población que se remontan al año 1964, para simular la configuración de una red ferroviaria construida muchos años antes. Estos anacronismos pueden representar un sesgo, sobre todo si tenemos en cuenta que la propia configuración consumada puede ser una de las causas más importantes de la actividad económica y/o la población de los nodos.

Modelo gravitacional de distribución de viajes

En los modelos de planeación del transporte la analogía Newtoniana ha sido enriquecida con diversas hipótesis, como se muestra en la figura 3.38:

Los viajes entre las zonas i y j son una función de:

- 1) Los viajes originados en la zona i ,
- 2) El nivel de atracción de la zona j y
- 3) La accesibilidad de la zona j con respecto a las demás zonas.

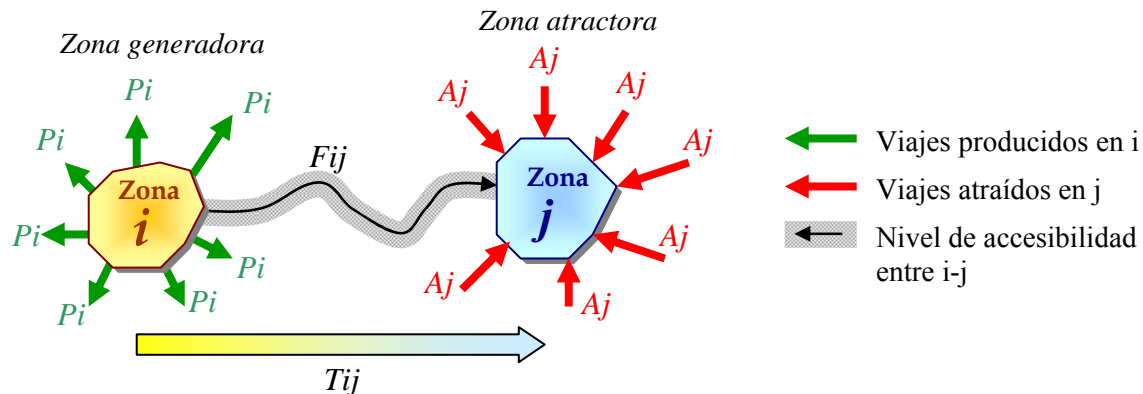


Figura 3.38 Conceptualización de las variables gravitacionales en el transporte.

Fuente: elaboración propia.

La expresión del modelo gravitacional que corresponde a los viajes producidos o atraídos por las diversas zonas es:

$$T_{ij} = \frac{P_i A_j F_{ij} K_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j F_{ij} K_{ij}}$$

Donde:

- T_{ij} = son los viajes producidos en la zonas i y atraídos a la zona j ,
- P_i = son los viajes producidos en la zona i ,
- A_j = son los viajes atraídos por la zona j ,
- F_{ij} = Factor empíricamente derivado del tiempo de viaje que expresa el efecto promedio de la separación espacial en el intercambio de viajes entre zonas. Se le denomina *resistencia* (o *impedancia*) de los viajes producidos, y puede ser la fricción de la distancia, costo de transporte, etc.
- K_{ij} = Factor de ajuste específico de zona a zona, determinado empíricamente para ajustar los viajes interzonales en función de condiciones socioeconómicas, permite incorporar el efecto de uniones socioeconómicas no contempladas en otra parte de la formulación del modelo gravitacional sobre los patrones de viaje.

Si en una zona i existen P_i extremos de viaje que son generadores, y en la zona j existen A_j extremos de viaje que son atractores, el objetivo del modelo gravitacional de distribución es determinar el número de viajes T_{ij} que se producirán de la zona i a la zona j . Es decir, el modelo gravitacional de distribución de viajes calcula la proporción de viajes generados en la zona i que se dirigen a la zona j , absorbiendo así una parte de la capacidad de generación de la zona i que se dirige a la zona j .

Este modelo de distribución debe cumplir con las siguientes restricciones:

- La sumatoria de todos los viajes que tienen por destino la zona i debe ser igual al total de viajes atraídos por esa zona en el mismo período

$$\sum_i V_{ij} = A_j$$

- La sumatoria de todos los viajes que de una zona j llegan a las demás debe ser igual al total de viajes que salen de esa zona en el mismo período

$$\sum_j V_{ij} = P_i$$

Cuando el modelo cumple con ambas restricciones al mismo tiempo, es conocido como *modelo de gravitacional doblemente restringido*.

Este modelo se aplica en dos etapas, la primera corresponde a la *calibración*, que es un proceso iterativo en el cual se procuran calcular los valores de F y K partiendo de las matrices de viaje conocidas y los tiempos de viaje entre zonas (o distancia, costos etc.). La segunda etapa corresponde a la predicción de los viajes.

El planteamiento anterior se complementa mediante el método de síntesis, que consiste en convertir las variables en funciones, lo que permite mayor flexibilidad en el modelado. La expresión sintética general de los modelos gravitacionales es la que se muestra enseguida:

$$T_{ij} = k \cdot a_j \cdot g_i \cdot f(c_{ij})$$

Donde:

- a_j = atracción de la zona j ,
- g_i = generación de viajes en la zona i ,
- f = función que expresa la resistencia del viaje,
 C_{ij} es el costo por desplazarse de i a j ,
- k = constante

El hecho de utilizar funciones permite al usuario simplificar la expresión para el cálculo, sin embargo no disminuye la complejidad del modelo.

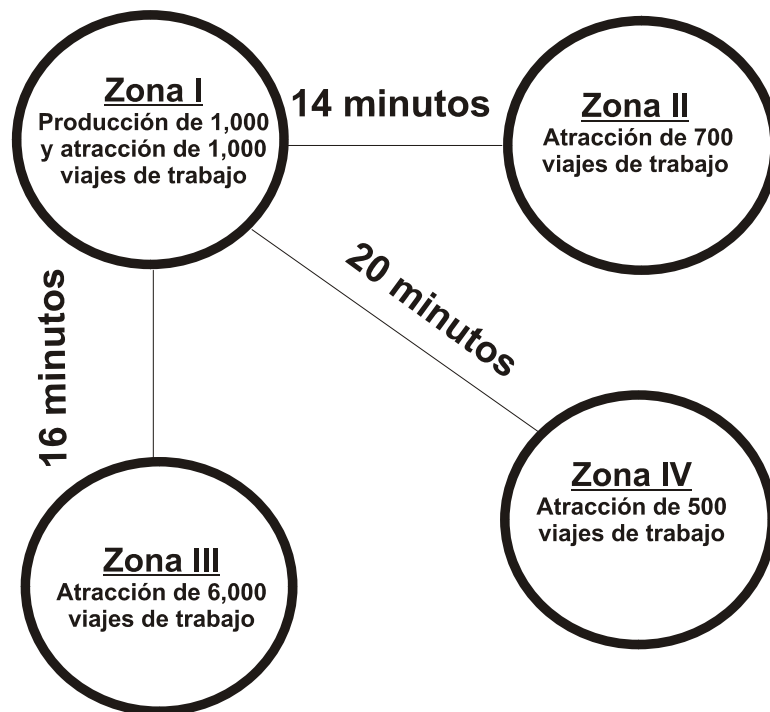
Ejemplo de aplicación No. 6. Aplicación del modelo gravitacional de distribución de viajes.

Los viajes de trabajo producidos por los residentes de una zona residencial son distribuidos en un área de estudio que cuenta con cuatro zonas industriales. El problema puede enunciarse de la siguiente forma (*U.S. Department Of Transportation, 1983.*):

Mil viajes de trabajo son producidos por los residentes de la zona 1 cada día. Se desea distribuir estos viajes a las zonas 1, 2, 3 y 4. Las cuatro posibles zonas de atracción tienen las siguientes características:

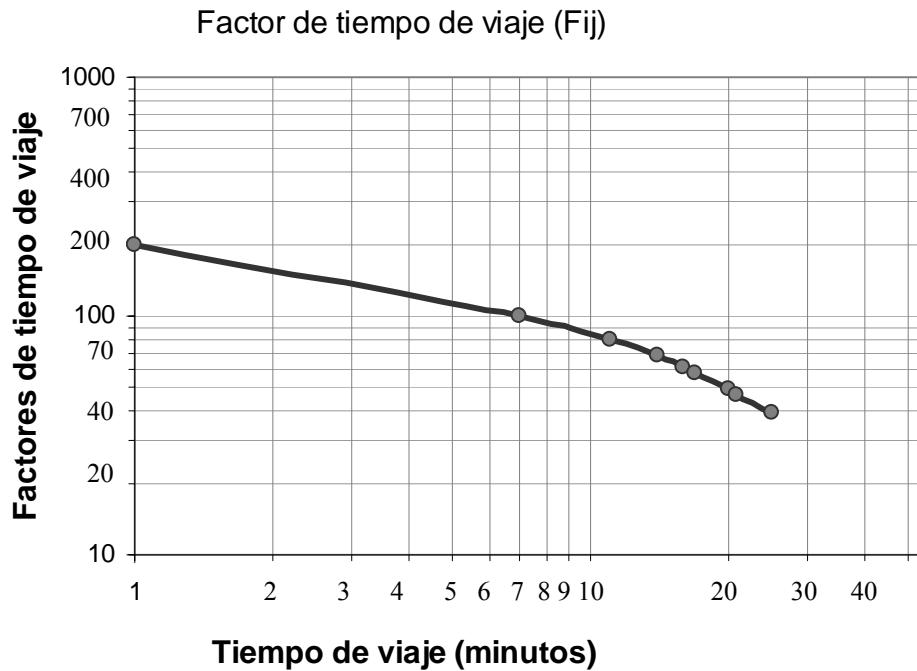
- La zona 1 tiene un tiempo intrazonal de 1 minuto y tiene 1,000 viajes de trabajo atraídos de todas las zonas del área en estudio.
- La zona 2 está a 14 minutos de la zona 1 y tiene un total de 700 viajes de trabajo atraídos desde todas las zonas dentro del área en estudio.
- La zona 3 está a 16 minutos de la zona 1 y atrae un total de 6,000 viajes de trabajo desde todas las zonas dentro del área en estudio.
- La zona 4 está a 20 minutos de la zona 1 y tiene en total 500 viajes de trabajo atraídos de todas las zonas del área en estudio.

La figura 3.39 ilustra el problema en forma de grafo.



*Figura 3.39 Problema hipotético de 4 zonas.
Fuente: U.S. Department Of Transportation, 1983.*

A continuación se presenta una gráfica con los factores de impedancia del problema propuesto.



Gráfica 3.5 Factores de impedancia por la separación espacial.

Fuente: U.S. Department Of Transportation, 1983.

Utilizando los factores de tiempo de viaje (Fij) de la tabla de la derecha (3.6) con la fórmula del modelo gravitacional (abajo), el patrón de la distribución de los viajes de trabajo para la zona 1 está determinado como se muestra posteriormente en la tabla 3.7. Nota: Los factores de ajuste Kij no fueron utilizados para este ejemplo.

$$T_{ij} = \frac{P_i A_j F_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j F_{ij}}$$

Tiempo de viaje (minutos)	Factor de tiempo de viaje (Fij)
1.0	200
7.0	100
11.0	80
14.0	68
16.0	61
17.0	58
20.0	49
21.0	47
25.0	39

Tabla 3.6 Factores de impedancia tiempo de viaje para el problema hipotético.

Fuente: U.S. Department Of Transportation, 1983.

La forma de hacer los cálculos se muestra a continuación:

$$\sum_{i=1}^4 A_j F_{ij} = 638,100$$

$$T_{11} = \frac{(1,000) \cdot (200,000)}{638,100} = 313.43$$

$$T_{13} = \frac{(1,000) \cdot (366,000)}{638,100} = 573.58$$

$$T_{12} = \frac{(1,000) \cdot (47,600)}{638,100} = 74.60$$

$$T_{14} = \frac{(1,000) \cdot (24,500)}{638,100} = 38.40$$

La siguiente tabla (3.7) muestra que P_i (los 1,000 viajes de trabajo producidos por los residentes de la zona 1) debería distribuirse como sigue: 313 viajes permanecen en la zona 1, 75 viajes a la zona 574 viajes a la zona 3 y 38 viajes a la zona 4.

par de zonas od	Viajes Producidos P_i	Viajes Atraídos A_j	Tiempo i-j	Factor de impedancia F_{ij}	$A_j \cdot F_{ij}$	Viajes T_{ij}	Porcentaje
1-1	1,000	1,000	1 min.	200	200,000	313.43	31.34%
1-2	1,000	700	14 min.	68	47,600	74.60	7.46%
1-3	1,000	6,000	16 min.	61	366,000	573.58	57.36%
1-4	1,000	500	20 min.	49	24,500	38.40	3.84%
<i>suma</i>					638,100	1,000	100.00%

Tabla 3.7 Aplicación del modelo gravitacional en el problema de ejemplo.
Fuente: Elaboración propia.

Para comprender la componente espacial de resultado a continuación se representa mediante grafos (Figura 3.40).

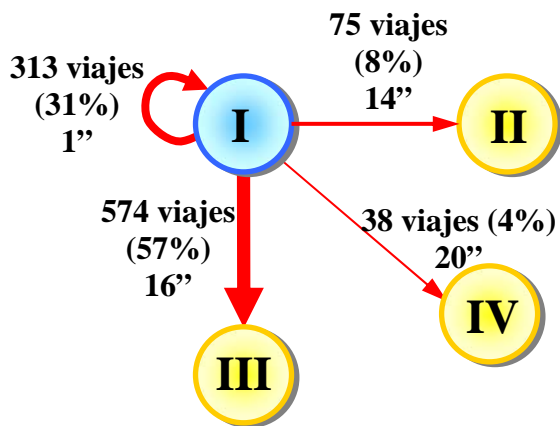


Figura 3.40 Componente espacial del resultado obtenido de la modelación.
Fuente: elaboración propia.

En la figura de la izquierda (3.40) se muestra la distribución de los 1,000 viajes que se generan en la región I. El grosor de las líneas representa el porcentaje de viajes. Los resultados obtenidos con ayuda del modelo gravitacional de distribución además permiten jerarquizar las interacciones en el sistema. Se observa claramente una relación muy fuerte entre las zonas I y III, mientras que las relaciones I-II y I-IV son débiles. Los viajes internos en la zona I tienen un orden de importancia en el sistema del 31%, por lo que se llega a deducir que este es su nivel de autosuficiencia

Ejemplo de aplicación No. 7. Pronóstico y distribución de viajes en tres zonas

Un área en estudio consiste en tres zonas. Los datos han sido determinados como se muestran en la siguiente tabla. Determine el número de viajes entre cada zona utilizando la fórmula del modelo gravitacional y los datos proporcionados. Considere $K_{ij}=1$.

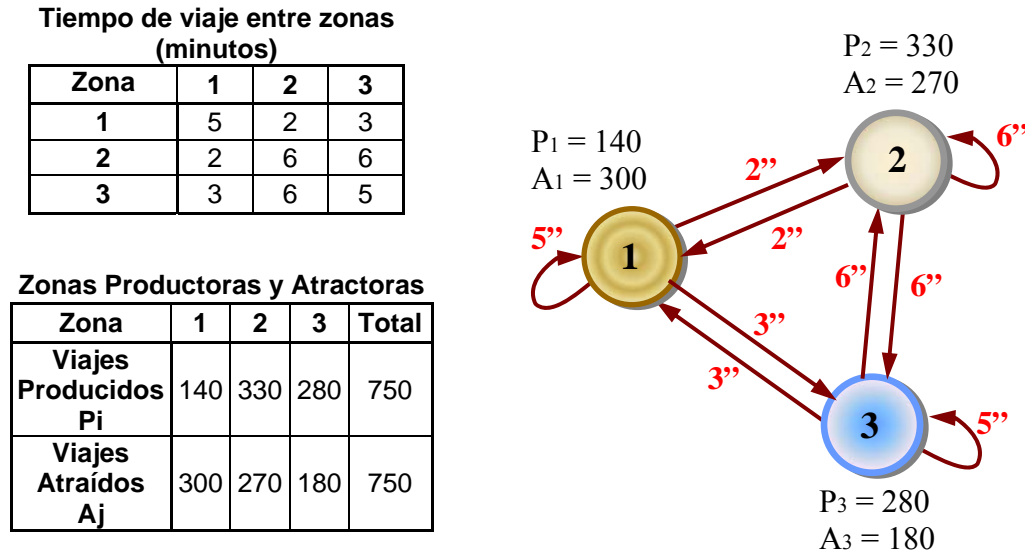
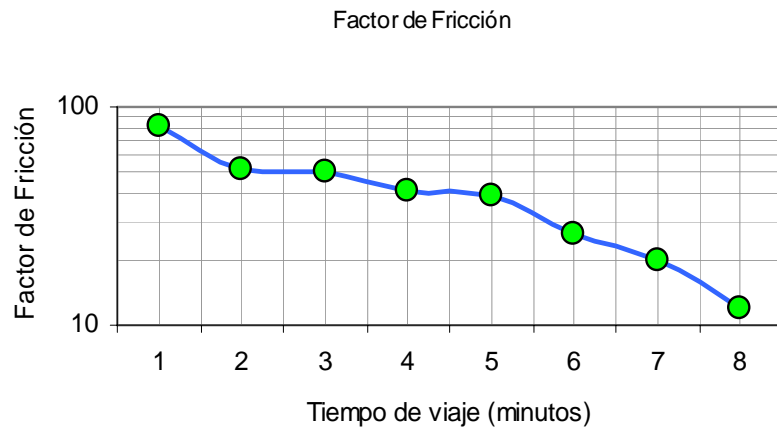


Fig. 3.41 Problema de tres zonas con sus respectivos tiempos de viaje y producción-atracción de viajes. Fuente: Elaboración propia.

Los factores de fricción se proporcionan a continuación para este problema, estos datos normalmente son necesarios para llevar a cabo el proceso de calibración descrito en este apartado.

Tiempo de viaje VS. Factor de Fricción

Tiempo (min.)	F
1	82
2	52
3	50
4	41
5	39
6	26
7	20
8	12



Gráfica 3.6 Factores de fricción para el problema de ejemplo. Fuente: Valores hipotéticos con fines demostrativos.

La solución se muestra a continuación:

3. EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS EN EL TRANSPORTE

En primer lugar se determina el factor de fricción para cada par origen-destino utilizando los tiempos de viaje y los factores de fricción proporcionados en el enunciado del problema.

Fij		Matriz de impedancias		
Zona		1	2	3
1		39	52	50
2		52	26	26
3		50	26	39

Tabla 3.8 Matriz de impedancias con los factores de fricción para los pares o-d del ejemplo.

Fuente: elaboración propia.

Al saber los factores de fricción para cada viaje potencialmente realizable, se comienza a resolver la ecuación gravitacional como se muestra a continuación.

$$T_{ij} = P_i \left[\frac{A_j F_{ij} K_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j F_{ij} K_{ij}} \right]$$

Donde:

- T_{ij} : Número de viajes producidos en la zona i que son atraídos a la zona j.
- P_i : Total de viajes producidos en la zona i.
- A_j : Total de viajes atraídos hacia la zona j.
- F_{ij} : Valor que es la función inversa del tiempo de viaje.
- K_{ij} : Factor de ajuste socioeconómico para el intercambio entre ij.

Resolver en primera instancia el factor $A * F * K$ en forma tabular simplifica el proceso.
Tabla de factor $A * F * K$ primera iteración

A_j	300	270	180	
$A_j F_{ij} K_{ij}$	1	2	3	suma
1	11,700	14,040	9,000	34,740
2	15,600	7,020	4,680	27,300
3	15,000	7,020	7,020	29,040

$$A_1 F_{1,1} K_{1,1} = (300)(39)(1) = 11,700$$

$$A_2 F_{1,2} K_{1,2} = (270)(52)(1) = 14,040$$

$$A_3 F_{1,3} K_{1,3} = (180)(50)(1) = 9,000$$

$$\text{Suma: } 34.740$$

$$A_1 F_{2,1} K_{2,1} = (300)(52)(1) = 15,600$$

$$A_2 F_{2,2} K_{2,2} = (270)(26)(1) = 7,020$$

$$A_3 F_{2,3} K_{2,3} = (180)(26)(1) = 4,680$$

$$\text{Suma: } 27,300$$

$$A_1 F_{3,1} K_{3,1} = (300)(50)(1) = 15,000$$

$$A_3 F_{3,3} K_{3,3} = (180)(39)(1) = 7,020$$

$$A_3 F_{3,3} K_{3,3} = (180)(39)(1) = 7,020$$

$$\text{Suma: } 29,040$$

Tabla 3.9 Cálculo del factor $A * F * K$. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez que los términos $A * F * K$ para cada origen-destino han sido tabulados, es posible insertar estos valores en la fórmula del modelo gravitacional para determinar el número de viajes entre cada zona. La siguiente tabla (3.10) ilustra esto:

Matriz de interacciones (primera iteración)

Pi	Tij	1	2	3	Suma Tij (P)
140	1	47.15	56.58	36.27	140
330	2	188.57	84.86	56.57	330
280	3	144.63	67.69	67.69	280
750	Suma Tij (A)	380.35	209.12	160.53	750
	Aj	300	270	180	750
	diferencia	26.78%	-22.55%	-10.82%	

Tabla 3.10 Cálculo de la distribución de viajes entre zonas para el problema de ejemplo.

Fuente: elaboración propia.

Se muestra a continuación, a manera de ejemplo la forma de obtener los valores de T_{ij} para la columna 1 mostrados en la tabla 3.10

$$T_{ij} = P_i \left[\frac{A_j F_{ij} K_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j F_{ij} K_{ij}} \right]$$

$$T_{1,1} = 140 \left[\frac{11,700}{34,740} \right] = 47.15$$

$$T_{2,1} = 330 \left[\frac{15,600}{27,300} \right] = 188.57$$

$$T_{3,1} = 280 \left[\frac{15,000}{29,040} \right] = 144.63$$

$$\text{Suma Tij (A):} \quad 380.35$$

El renglón A_j en la tabla “3.10” corresponde a los viajes atraídos por cada zona, los cuales fueron proporcionados al inicio del problema. Puesto que la diferencia entre el valor calculado en la primera columna (380.35) y el valor proporcionado ($A_j = 300$) es mayor al 5% admisible (es de 26.78%), es necesario hacer un ajuste a los factores de atracción. Este procedimiento se hace a través de la siguiente fórmula:

$$A_{jk} = \left[\frac{A_j}{C_{j(k-1)}} \right] A_{j(k-1)}$$

Donde:

A_{jk} : Factor de atracción ajustado para la zona j (columna), iteración k.

$$A_{jk} = A_j \quad \text{cuando } k=1$$

$C_{j(k-1)}$: Atracción total actual (columna) para la zona j, iteración k.

A_j : Atracción total deseada para la zona (columna) j.

j : Número de zona de atracción.

k : Número de iteración.

Para producir un resultado matemáticamente correcto se repite el cálculo de la distribución de viajes utilizando los valores modificados de atracción.

3. EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS EN EL TRANSPORTE

$$A_{12} = \left[\frac{300}{380.35} \right] 300 = 236.62$$

$$A_{22} = \left[\frac{270}{209.12} \right] 270 = 348.60$$

$$A_{32} = \left[\frac{180}{160.53} \right] 180 = 201.84$$

Tabla 3.11 Cálculo de los nuevos factores de atracción A_j para la calibración del modelo.

Fuente: elaboración propia.

Zona	1	2	3
A_{j1}	380.35	209.12	160.53
Viajes Atraídos	300	270	180
A_{j2}	236.62	348.60	201.84

Valores de la primera iteración →

Valores obtenidos en la primera iteración →

Nuevos valores para la segunda iteración →

Cálculo del factor $A*F*K$ segunda iteración

Fij Matriz de impedancias

Zona	1	2	3
1	39	52	50
2	52	26	26
3	50	26	39

A_{j2}	236.62	348.60	201.84	
$A_j F_{ij} K_{ij}$	1	2	3	suma
1	9,228.35	18,127.10	10,091.77	37,447.22
2	12,304.46	9,063.55	5,247.72	26,615.73
3	11,831.21	9,063.55	7,871.58	28,766.35

Tabla 3.12 Segunda iteración del cálculo de la distribución de viajes entre zonas para el problema de ejemplo. Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestran las operaciones matemáticas realizadas para rellenar la tabla anterior (3.13).

		Atracciones			
Producciones	Tij	1	2	3	suma
	1	34.50	67.77	37.73	140
	2	152.56	112.38	65.06	330
	3	115.16	88.22	76.62	280
	Suma Tij	302.22	268.37	179.41	750
	A_j	300	270	180	750
	diferencia	0.74%	-0.60%	-0.33%	0.00%

$$A_1 F_{2,1} K_{2,1} = (236.62)(52)(1) = 12,304.46$$

$$A_2 F_{2,2} K_{2,2} = (348.60)(26)(1) = 9,063.55$$

$$A_3 F_{2,3} K_{2,3} = (201.84)(26)(1) = 5,247.72$$

$$\text{Suma: } 26,615.73$$

$$A_1 F_{1,1} K_{1,1} = (236.62)(39)(1) = 9,228.35$$

$$A_2 F_{1,2} K_{1,2} = (348.60)(52)(1) = 18,127.10$$

$$A_3 F_{1,3} K_{1,3} = (201.84)(50)(1) = 10,091.77$$

$$\text{Suma: } 37,447.22$$

$$A_1 F_{3,1} K_{3,1} = (236.62)(50)(1) = 11,831.21$$

$$A_2 F_{2,3} K_{2,3} = (348.60)(26)(1) = 9,063.55$$

$$A_3 F_{3,3} K_{3,3} = (201.84)(39)(1) = 7,871.58$$

$$\text{Suma: } 28,766.35$$

Tabla 3.13 Segunda iteración del cálculo de la distribución de viajes entre zonas para el problema de ejemplo. Fuente: elaboración propia.

Se muestra a continuación, a manera de ejemplo la forma de obtener los valores de T_{ij} para la columna 1 mostrados en la tabla 3.13.

$$T_{ij} = P_i \left[\frac{A_j F_{ij} K_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_j F_{ij} K_{ij}} \right]$$

$$T_{1,1} = 140 \left[\frac{9,228.35}{37,447.22} \right] = 34.50$$

$$T_{2,1} = 330 \left[\frac{12,304.46}{26,615.73} \right] = 152.56$$

$$T_{3,1} = 280 \left[\frac{11,831.21}{28,766.35} \right] = 115.16$$

Suma T_{ij} (A): 302.22

Suma T_{ij} - A_j = 302.22 - 300 = 2.22 \approx 0.74%

Al terminar la segunda iteración, las atracciones calculadas se encuentran dentro del rango del 5%. Este resultado se considera aceptable. El resultado puede expresarse tubularmente o como grafo (figura 3.42).

Tabla 3.14 Tabla con los resultados del modelo gravitacional de distribución de viajes. Fuente: elaboración propia.

Tij	1	2	3	Suma producciones
1	35	68	38	141
2	153	112	65	330
3	115	88	76	279
Suma atracciones	303	268	179	750

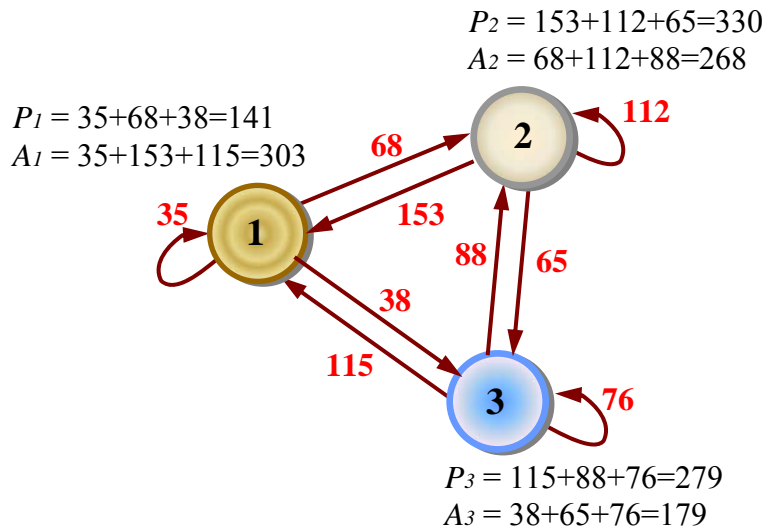


Figura 3.42 Representación mediante grafos del resultado obtenido por el modelo gravitacional de distribución de viajes. Las flechas indican la interacción entre zonas y el número de viajes.

Fuente: elaboración propia.

Estructura general de una matriz O-D para aplicar el modelo gravitacional compuesto.

La estructura de esta matriz es la mostrada en la siguiente tabla, donde $\sum TA_j$, $\sum TB_j$ y $\sum TC_j$ son los índices de interacción para cada localidad i de origen (A, B y C). De igual forma los valores de $\sum TiA$, $\sum TiB$ y $\sum TiC$ son los índices de interacción para los destinos j . La suma (T_{ij}) da como resultado un índice de interacción total del sistema.

		DESTINOS j			MODELO $\sum_{j=1}^n T_{i,j} = \sum_{j=1}^n \frac{\omega_i V_i^\lambda \omega_j W_j^\alpha}{S_{i,j}^\beta}$
		A ω_A w_A α_A	B ω_B w_B α_B	C ω_C w_C α_C	
ORIGENES i	A ω_A, V_A, λ_A	$S_{A,A}$ $\beta_{A,A}$	$S_{A,B}$ $\beta_{A,B}$	$S_{A,C}$ $\beta_{A,C}$	$\sum TA_j$
	B ω_B, V_B, λ_B	$S_{B,A}$ $\beta_{B,A}$	$S_{B,B}$ $\beta_{B,B}$	$S_{B,C}$ $\beta_{B,C}$	$\sum TB_j$
	C ω_C, V_C, λ_C	$S_{C,A}$ $\beta_{C,A}$	$S_{C,B}$ $\beta_{C,B}$	$S_{C,C}$ $\beta_{C,C}$	$\sum TC_j$
	MODELO $\sum_{j=1}^n T_{i,j} = \sum_{j=1}^n \frac{\omega_i V_i^\lambda \omega_j W_j^\alpha}{S_{i,j}^\beta}$	$\sum TiA$	$\sum TiB$	$\sum TiC$	$T_{ij} :$ $[\sum TA_j + \sum TB_j + \sum TC_j]$ $=$ $[\sum TiA + \sum iB + \sum TiC]$

Tabla 3.15 Estructura general de una matriz O/D para flujos o impedancias
Fuente: elaboración propia.

En la siguiente figura (3.43) se muestra un sistema espacial que contiene la información requerida para aplicar el modelo gravitacional compuesto. En este caso se considera como medida de la separación espacial la distancia en kilómetros entre las localidades. Como se mencionó anteriormente, el exponente de fricción de transporte β (beta) relaciona la eficiencia del sistema de transporte entre cada par de localidades, mientras más grande sea su valor, disminuirá la intensidad de las interacciones.

En el ejemplo a las autopistas se les asignó un exponente $\beta = 0.5$ y a las carreteras con un sólo carril de $\beta = 2.0$ con el fin de incluir en el modelo factores como velocidad permitida, seguridad y confort. Obviamente estos exponentes deben ser calibrados para reflejar con mayor exactitud el comportamiento real del sistema. En otros casos, esta variable puede representar diferencias en el costo de transportación, consumo de energía o preferencias de los usuarios.

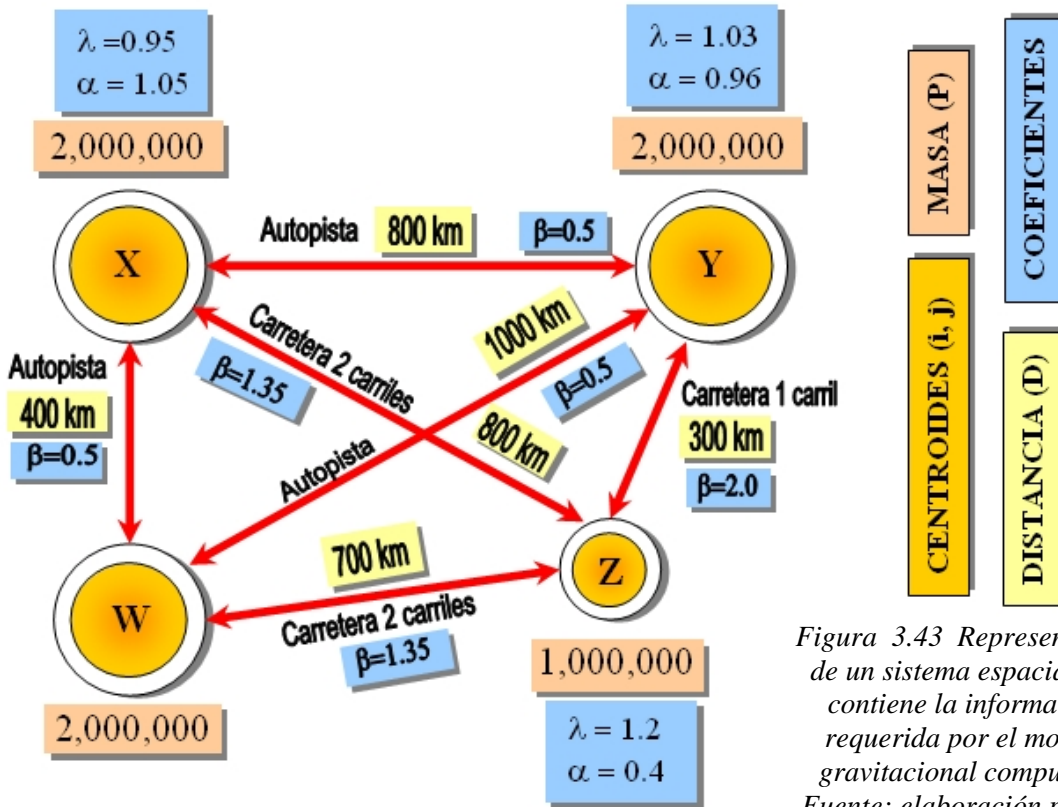


Figura 3.43 Representación de un sistema espacial que contiene la información requerida por el modelo gravitacional compuesto. Fuente: elaboración propia.

La información de la figura anterior vaciada en una matriz o-d se muestra a continuación en la tabla 3.16 y el resultado del índice de interacción en la 3.17:

O/D	W	X	Y	Z
	$W_W = 2,000,000$ $\alpha_W = 0.95$	$W_X = 2,000,000$ $\alpha_X = 1.05$	$W_Y = 2,000,000$ $\alpha_Y = 0.96$	$W_Z = 1,000,000$ $\alpha_Z = 0.4$
W $V_W = 2,000,000$ $\lambda_W = 1.0$	$S_{W,W} = 0$ KM. $\beta_{W,W} = 0$	$S_{W,X} = 400$ KM. $\beta_{W,X} = 0.5$	$S_{W,Y} = 1000$ KM. $\beta_{W,Y} = 0.5$	$S_{W,Z} = 700$ KM. $\beta_{W,Z} = 1.35$
X $V_X = 2,000,000$ $\lambda_X = 0.95$	$S_{X,W} = 400$ KM. $\beta_{X,W} = 0.5$	$S_{X,X} = 0$ KM. $\beta_{X,X} = 0$	$S_{X,Y} = 800$ KM. $\beta_{X,Y} = 0.5$	$S_{X,Z} = 800$ KM. $\beta_{X,Z} = 1.35$
Y $V_Y = 2,000,000$ $\lambda_Y = 1.03$	$S_{Y,W} = 1000$ KM. $\beta_{Y,W} = 0.5$	$S_{Y,X} = 800$ KM. $\beta_{Y,X} = 0.5$	$S_{Y,Y} = 0$ KM. $\beta_{Y,Y} = 0$	$S_{Y,Z} = 300$ KM. $\beta_{Y,Z} = 2.0$
Z $V_Z = 1,000,000$ $\lambda_Z = 1.2$	$S_{Z,W} = 700$ KM. $\beta_{Z,W} = 1.35$	$S_{Z,X} = 300$ KM. $\beta_{Z,X} = 1.35$	$S_{Z,Y} = 300$ KM. $\beta_{Z,Y} = 2.0$	$S_{Z,Z} = 0$ KM. $\beta_{Z,Z} = 0$

Tabla 3.16 Matriz O/D del sistema espacial de la figura 3.42. Fuente: elaboración propia.

3. EL MODELO GRAVITACIONAL COMO INDICADOR DE INTERACCIONES SOCIOECONÓMICAS EN EL TRANSPORTE

A continuación se muestra el cálculo del índice de interacción gravitacional utilizando los datos del ejemplo y una hoja de cálculo convencional.

ID	i	Masa i	λ	j	Masa j	α	Sij	β	Tij od	%Tij od	%Tij tot
1	W	2,000,000	1	W	2,000,000	0.95	0	0.00	0.00	0.00%	0.00%
2	W	2,000,000	1	X	2,000,000	1.05	400	0.50	413,125,017,709.97	85.37%	36.71%
3	W	2,000,000	1	Y	2,000,000	0.96	1000	0.50	70,797,641,717.50	14.63%	6.29%
4	W	2,000,000	1	Z	1,000,000	0.4	700	1.35	72,468.23	0.00%	0.00%
								subtotal	483,922,731,895.69	subtotal	43.00%
5	X	2,000,000	0.95	W	2,000,000	0.95	400	0.50	46,873,458,231.84	55.02%	4.16%
6	X	2,000,000	0.95	X	2,000,000	1.05	0	0.00	0.00	0.00%	0.00%
7	X	2,000,000	0.95	Y	2,000,000	0.96	800	0.50	38,319,717,456.12	44.98%	3.40%
8	X	2,000,000	0.95	Z	1,000,000	0.4	800	1.35	29,295.91	0.00%	0.00%
								subtotal	85,193,204,983.87	subtotal	7.57%
9	Y	2,000,000	1.03	W	2,000,000	0.95	1000	0.50	94,632,299,094.09	17.33%	8.41%
10	Y	2,000,000	1.03	X	2,000,000	1.05	800	0.50	451,437,256,015.67	82.67%	40.11%
11	Y	2,000,000	1.03	Y	2,000,000	0.96	0	0.00	0.00	0.00%	0.00%
12	Y	2,000,000	1.03	Z	1,000,000	0.4	300	2.00	8,626.18	0.00%	0.00%
								subtotal	546,069,563,735.94	subtotal	48.52%
13	Z	1,000,000	1.2	W	2,000,000	0.95	700	1.35	2,213,584,687.27	21.50%	0.20%
14	Z	1,000,000	1.2	X	2,000,000	1.05	800	1.35	7,886,966,806.00	76.59%	0.70%
15	Z	1,000,000	1.2	Y	2,000,000	0.96	300	2.00	197,127,078.89	1.91%	0.02%
16	Z	1,000,000	1.2	Z	1,000,000	0.4	0	0.00	0.00	0.00%	0.00%
								subtotal	10,297,678,572.16	subtotal	0.91%
total									1,125,483,179,187.67		

Tabla 3.17 La estructura de la matriz y el cálculo de Tij en una hoja de cálculo.
Fuente: elaboración propia.

Una vez explicados los diversos tipos, estructuras y aplicaciones del modelo gravitacional, el siguiente paso es trasladar estos conceptos a los sistemas de información geográfica desarrollando una metodología que utilice el índice de interacción gravitacional como criterio para el diseño de rutas de transporte de pasajeros. Esto se desarrollará en el capítulo siguiente.

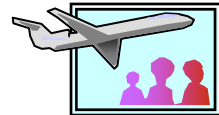
4

EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Objetivo: Explicar la metodología y demostrar la utilidad práctica del modelo gravitacional de interacción como herramienta en la planeación de rutas de transporte.

Este capítulo contiene un estudio de caso en el que se utilizó el modelo gravitacional de interacción como apoyo para el diseño de rutas de transporte público. Se expone a continuación los antecedentes del proyecto, la metodología y los resultados.

4.1 Antecedentes del estudio de caso: Aeropuerto Internacional de Toluca



Los servicios del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM) son los únicos del país que actualmente realizan viajes trasatlánticos y que tienen un amplio volumen de salidas y llegadas internacionales, además de comunicar a los más diversos puntos del país. Estos servicios se han saturando progresivamente y actualmente se encuentran en peligro de que en un futuro cercano dejen de prestarse de manera efectiva.

Debido a la necesidad apremiante de un nuevo aeropuerto para la ciudad de México, en años anteriores se realizaron numerosos estudios multidisciplinarios para determinar una ubicación ideal, sin embargo la posibilidad de construirlo fue descartada después de los conflictos de Atenco originados por problemáticas sociales de fondo. Este conflicto llegó a poner en riesgo la seguridad del país a tal grado, que fue necesario sopesar el costo social y el gobierno decidió la cancelación del proyecto.

Al quedar bloqueada la opción de reubicación de un aeropuerto lejano a la ciudad, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) buscó alternativas que de manera basta soportaran el aumento en la demanda del aeropuerto. Como una alternativa importante ha sido elegida la descentralización aeroportuaria de la ciudad de México. Esta se traduce en dirigir parte de la oferta actual hacia otros aeropuertos cercanos como los de Querétaro, Puebla, Toluca y Cuernavaca, esto en función a que se piensa que parte de la demanda se dirigiría hacia allá. El primer planteamiento fundamental de esta propuesta es el siguiente:

“ si existen N salidas al destino X utilizando el AICM, entonces parte de ese mercado es posible llevarlo a un aeropuerto cercano mientras no se eleve sustancialmente el precio y el tiempo del viaje”.

La SCT solicitó al Instituto de Geografía (IGg) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por su amplia experiencia en la investigación de fenómenos del transporte a distintas escalas, identificar y evaluar los mercados regionales y locales de los servicios de transporte terrestre y el potencial de los servicios aéreos comerciales de pasajeros nacionales que podrían desarrollar los aeropuertos de las ciudades de Toluca, Cuernavaca, Puebla y Querétaro, en el marco del proceso de desconcentración del AICM con el fin de proporcionar datos que brinden certidumbre a las inversiones y metas propuestas. Además se debe destacar que el enfoque fue considerar el transporte aéreo de pasajeros y no de carga.

En el estudio se analizaron aspectos generales de la oferta y se profundizó en el análisis de la demanda, considerando información estadística y cartográfica censal, así como estudios de opinión cuyos resultados se extrapolaron al ámbito geográfico considerado como zona de estudio la Región Centro para su correspondiente análisis.

El supuesto básico es que mediante la descentralización de viajes hacia los aeropuertos centrales (Toluca, Querétaro, Puebla y Cuernavaca) que se sitúan aproximadamente hacia los cuatro puntos cardinales de la principal ciudad del país, se diseñara una estrategia que sería una solución parcial pues proporciona algunos de los beneficios de un nuevo aeropuerto sin la necesidad de que este existiera. Esta descentralización se podría llevar a cabo mediante la redirección de destinos de la ciudad de México hacia los aeropuertos centrales, pero como esto implica ciertas incomodidades para los viajeros, se les podría “acercar” el aeropuerto hacia el que se descentraliza mediante rutas recolectoras de autobuses que saldrían de la ciudad de México hacia los diferentes aeropuertos. De esta manera se sumaría a los mercados locales una porción de los mercados de la ciudad de México.

Otro planteamiento fundamental es que la ciudad de México tiene varios accesos principales por donde entra la mayor parte de las personas y mercancías. Estos accesos están constituidos por:

- Las 4 principales terminales de autobuses,
- El Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México,
- Las terminales ferroviarias y
- Las entradas por carretera.

En el esquema de investigación ideal, lo más conveniente hubiera sido tener información de cada acceso sin embargo, por cuestiones de tiempo y presupuesto esto no pudo ser posible y se obtuvo de algunas únicamente, tratando de cubrir la mayor parte de las entradas. Otra hipótesis es que la entrada de ferrocarriles no tiene gran impacto en la competencia de la carga aérea pues en el transporte aéreo la carga tiene características muy diferentes.

En la siguiente figura (4.1) se muestra una representación de dichos accesos.

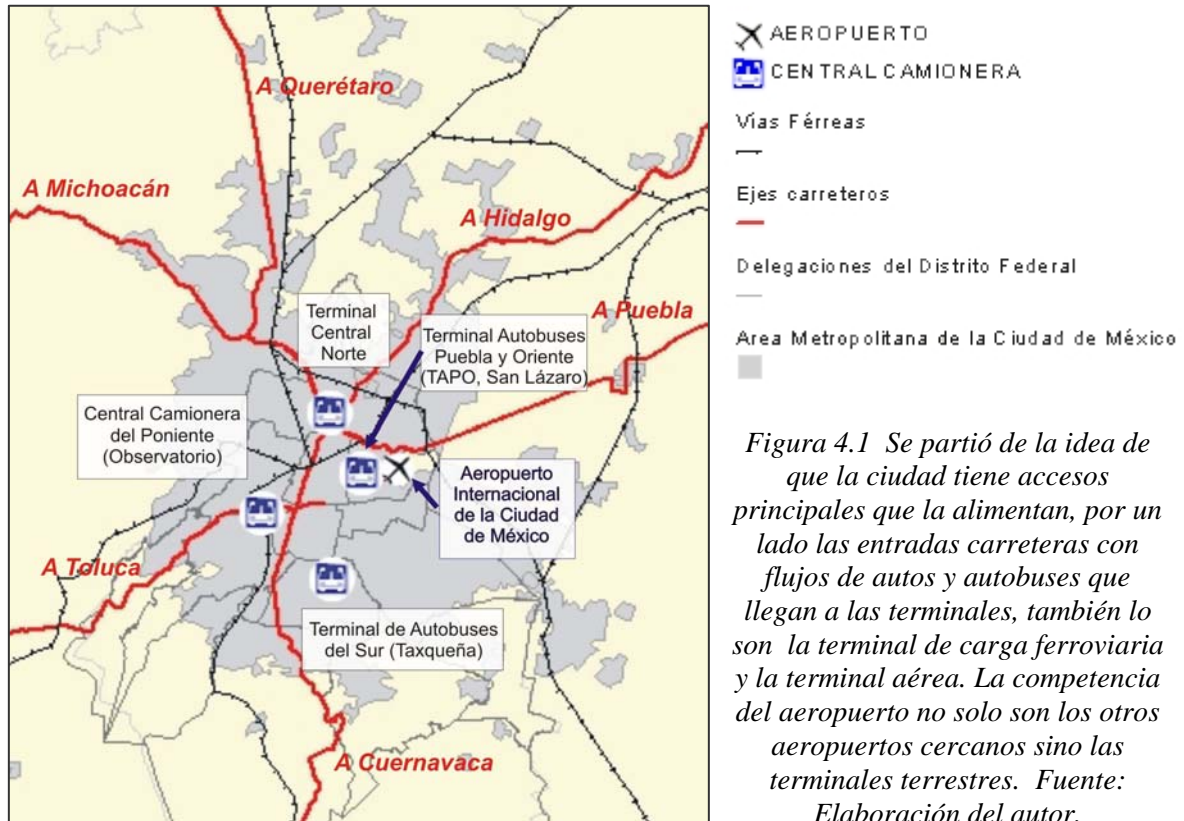


Figura 4.1 Se partió de la idea de que la ciudad tiene accesos principales que la alimentan, por un lado las entradas carreteras con flujos de autos y autobuses que llegan a las terminales, también lo son la terminal de carga ferroviaria y la terminal aérea. La competencia del aeropuerto no solo son los otros aeropuertos cercanos sino las terminales terrestres. Fuente: Elaboración del autor.

Objetivo general del proyecto

El objetivo del estudio es medir el tamaño del mercado en cada ciudad involucrada por microzonas de tal modo que se puedan generar rutas que permitan optimizar la recolección de pasajeros. Así mismo se busca evaluar el potencial que tiene cada uno de los aeropuertos considerados, para favorecer el proceso de desconcentración de los servicios aéreos comerciales de pasajeros del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

Objetivos particulares del proyecto

Para lograr el panorama anteriormente marcado se cumplieron una serie de objetivos particulares que se detallan a continuación:

- Procesar una encuesta de los pasajeros actuales (esta encuesta ya existía y la levantó la Secretaría de Comunicaciones y Transportes), para conocer el perfil de aquellas personas que viajan en avión hoy en día.
- Crear una encuesta para los pasajeros potenciales (encuesta propia de este estudio) con el fin de determinar cómo son los pasajeros que viajan por otros medios exceptuando el avión o que viajan en avión y autobús.
- A partir de dicha información, medir los mercados potenciales y actuales mediante diversos modelos geoestadísticos que permitan identificar las microzonas de alto potencial y mercado.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

- Evaluar el tamaño y estructura del mercado potencial considerando el perfil de usuarios de los servicios aéreos (edad, empleo, ingresos, etc.) lo que permite caracterizar la estructura socioeconómica de las metrópolis consideradas. Cabe destacar que los objetivos descritos hasta este punto fueron desarrollados por otro grupo interdisciplinario independiente que también estuvo involucrado en el proyecto.
- Con base en tales mediciones, obtener rutas óptimas y centros de atención para el desarrollo de transporte terrestre de comunicación entre los centros de demanda y los puntos de partida aeroportuaria considerados.
- Identificar el área de influencia de cada aeropuerto tomando en cuenta los tiempos de desplazamiento desde cada Terminal Aérea.
- Propuesta de rutas de transporte de pasajeros que puedan satisfacer la demanda estimada por los análisis anteriores.

Escalas de análisis

Se propone realizar el estudio considerando dos escalas de análisis (figura 4.2): la Regional y la Metropolitana. En la Escala Regional se identifican y tipifican las áreas de influencia y el mercado potencial de cada aeropuerto, a escala 1: 250 000, por lo que el análisis se hace considerando la jerarquía y características a nivel localidad. En la escala Metropolitana se identifican y caracterizan las áreas de servicio y el mercado potencial considerando las AGEB (Áreas Geostatísticas Básicas) del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI*).

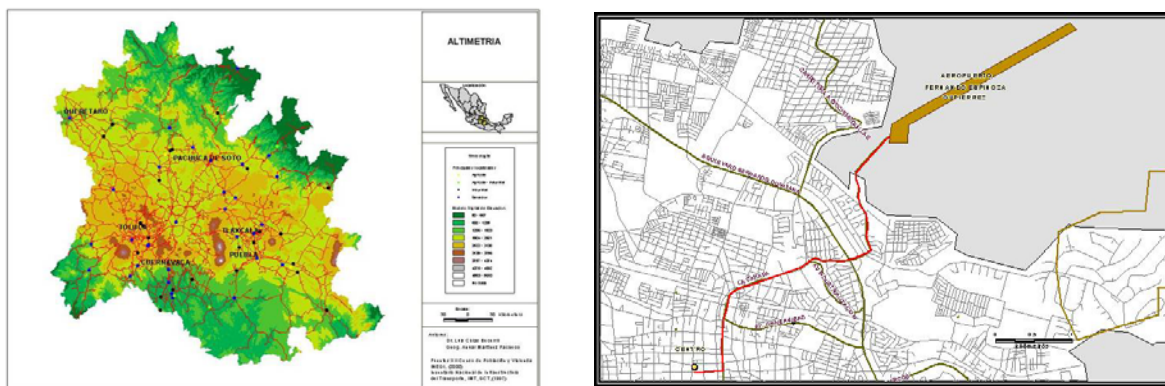


Figura 4.2 Ejemplo de la información en las escalas de análisis en la investigación. A la izquierda, escala regional, derecha, escala metropolitana. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

Fuentes consultadas

Para la realización del estudio se consultaron las siguientes fuentes:

- Muestra censal en formato de cuestionario ampliado*, Encuesta Nacional de Ingreso y Gasto en los Hogares 2000* y Censo de Población y Vivienda 2000*.
- Encuesta SCT y encuesta UNAM levantada exproposito para este efecto.
- Paginas electrónicas de la SCT y del AICM.

Alcance del estudio

El estudio se sustenta en diversos modelos, estadísticos, económicos y espaciales, por lo cual, pueden haberse generado resultados que no expresen el comportamiento de las variables exactamente tal y como sucede en la realidad. Un modelo con predicción absoluta difícilmente es posible pues la relación costo-beneficio lo haría prohibitivo.

Fuentes de error

Como se mencionó anteriormente, en este proyecto participaron diversos grupos de trabajo multidisciplinarios y se reconocen las siguientes fuentes de error:

Por estructura de los datos. En México la mínima unidad censal es el AGEB, que por lo regular, ocupa entre 20 y 40 manzanas. Para esta área se cuenta con la más diversa información como población por rangos de edad, niveles de estudio y otras variables tanto censales de población como económicas. Cuando se trata de localidades pequeñas, no se cuenta con datos agregados en esta forma, lo que genera una subestimación de población total de entre el 15% y el 20%. Sin embargo se puede suponer que la subestimación de viajes es menor, pues las localidades menores de 2,500 habitantes generarían menos viajes que las localidades mayores que siempre tienen referencia a AGEB. Se estima que este error es no mayor del 10% para el total de viajes estimados.

Por estadística. Los errores estadísticos son parte inherente a la proyección de datos. Buscando cubrirlos, se establecen los rangos de confianza sobre los que se trabaja. En particular el modelo utilizado para estimar la demanda ofreció un error de 20% en la pertenencia o no a un grupo de perfil de usuario. En cuanto a la encuesta llevada a cabo, se estima que tiene un nivel de confianza mínimo de 90%.

Por error de la fuente. Este estudio contiene referencias provenientes de diversas fuentes públicas por lo que pueden existir datos incompletos por falta de actualización. Por el otro lado, todos los datos utilizados en los modelos cuantitativos han sido tomados de fuentes oficiales.

Errores metodológicos. Aunque evidentemente los errores metodológicos en teoría se pueden ubicar, en ocasiones el costo de erradicarlos es mayor que el beneficio que se pudiera obtener de ello. Los días de levantamiento de la encuesta de la SCT generan incertidumbre porque se levantaron en periodo vacacional. Por otro lado, no se pudieron levantar encuestas en la terminal del sur, lo cual irremediablemente también añade un error al estudio al no captar las características de las personas que viajan ahí. Por otro lado se parte del supuesto de que a cualquier viajero de avión podemos tenerlo también como viajero en terminal de autobuses considerando que los viajeros viajan indistintamente a destinos cercanos para los cuales no hay viajes aéreos (Toluca, Querétaro, Puebla, Tlaxcala, Cuernavaca, etc.) sin embargo puede haber cierta preferencia de que personas de niveles socioeconómicos más altos, hagan estos viajes en automóvil.

Recomposición de la oferta

Continuando con los antecedentes del estudio de caso, primero se analizarán los factores que permiten hablar de una recomposición de la oferta que cubre todos los cambios que surgen en las instituciones encargadas de promover este servicio.

a. Reestructuración de las líneas aéreas

A escala global, las líneas aéreas después del 11 de septiembre de 2001 sufrieron fuertes bajas en sus ingresos por el incremento de los gastos en seguridad, también la demanda disminuyó drásticamente por el miedo al terrorismo. Por mencionar algunos casos, United recibió apoyo del gobierno norteamericano, Delta la tercera línea de EU ha tenido que negociar con su sindicato para poder evitar la quiebra, Continental realizó cientos de despidos. También las líneas aéreas europeas han sufrido problemas, British realizó fuertes recortes de personal y Airbus ha tenido problemas para cobrar préstamos a US Airways. Las líneas aéreas mexicanas también han resentido los efectos del 11 de septiembre pues observan vuelos menos nutridos hacia EU no por el miedo al terrorismo, ni por el descenso de la demanda, sino porque la oferta de visas en EU esta limitada. Toda esta situación paradójicamente, ayudó a que el AICM no se saturara en los tiempos que habían sido previstos. En el año 2000, el crecimiento de la demanda aeroportuaria era del 5% anual, con lo que se preveía un momento crítico entre el 2005 y el 2006. Los acontecimientos hicieron que la saturación se retrasara pero finalmente tendrá que llegar el momento pues se retomó el crecimiento rápidamente.

Existen múltiples factores que compensan la situación de recesión por la que estuvo durante algunos meses la aviación:

- La participación de líneas aéreas pequeñas que pueden mover nuevos usuarios por medio de tarifas menores, incrementando la demanda,
- El aumento de la oferta con nuevos y mejores aeropuertos,
- El rezago de otras formas de transporte entre otros.

Esto ha permitido retrasar la crisis previsible aeroportuaria, pero las alternativas deben plantearse cuanto antes.

b. Mercado carretero

Un problema de transporte en México es que los distintos modos no son siempre complementarios sino que compiten entre si. El caso típico es el de la transportación Distrito Federal-Tijuana, pues el costo prácticamente es el mismo al viajar en avión utilizando líneas pequeñas que utilizando el autobús. Pese a esto, el autobús conserva su demanda. La red carretera en México aún con sus lentas mejorías, ha sustituido viajes aéreos por viajes terrestres. Por ejemplo el viaje Distrito Federal-Acapulco hace 15 años implicaba de 8 a 10 horas, y ahora puede realizarse en 5 horas. Según Caminos y Puentes Federales (CAPUFE), el uso de la carretera se ha multiplicado en 5 veces desde 1960 a la fecha. Esto ha generado una derrama económica importante, pues simplemente esta dependencia recibe 6,500 millones de pesos anuales de ingresos, dicho de otra forma, más de un millón por kilómetro de carretera. Afortunadamente para el transporte aéreo, este crecimiento ha sido muy lento: en 1996, la red carretera era de 312,301 km., mientras que en 2004 fue de 365,119, en promedio unos 6,500 km. por año. Además del kilometraje añadido, las carreteras han incrementado su calidad. Esta cantidad de carretera equivale a darle ocho vueltas a la tierra. Aún así, quedan lugares en nuestro país donde no existe gran

densidad y cuando esto coincide con mercados potenciales se convierten en nichos de oportunidad. Por estos caminos pasan cada año 2,700 millones viajeros y más de 600 millones de toneladas de carga, en más de 350 millones de vehículos, con lo cual el transporte terrestre, queda como el principal medio de traslado, con aproximadamente 60% del tonelaje total que viaja por el país y el 98% de los pasajeros. En cambio la transportación aérea para el año 2003 apenas registró 300 mil toneladas de carga en líneas internacionales y 195 mil en líneas nacionales. Como se puede observar, aparte de que no existe una franca competencia entre líneas aéreas, su principal competidor lo representa el transporte terrestre. Sin embargo esa competencia no se da por igual en todos los lugares de la República. La preponderancia del modo carretero en México ocurre a pesar de que la mayoría de las carreteras han aumentado sus cuotas por peaje siguiendo el plan de ajuste producto de la inflación. El negocio carretero tiene tal tamaño de demanda y puede llegar a ser tan rentable que inclusive está en proceso de bursatilización. La conexión de las ciudades de México por vía carretera es muy importante. La autopista México-Puebla es la más rentable del sistema carretero, por ahí circularon en el 2002 más de 36 millones de vehículos, en segundo lugar está la autopista México-Querétaro, por donde transitaron 26 millones de vehículos, siguiendo Querétaro-Irapuato con 12 millones. Por otra parte la carretera México-Toluca esta clasificada como una de las más caras del mundo en relación kilómetro/peaje y también una de las más peligrosas. Uno de los problemas que ha tenido el sistema carretero mexicano es que en el momento de su desincorporación los concesionarios no estimaron bien los aforos y los precios, dando por resultado una sobrevaloración de la demanda que al unirse con un aumento en los costos llevo a un problema financiero grave. Con todo, el sistema carretero sigue siendo el principal modo de transporte en México, al que le llega mayor inversión, a veces en detrimento de otros modos de mayor eficiencia potencial y lo coloca como un competidor fundamental del transporte aéreo, por eso es que en esta investigación será tan importante examinar como se mueve la demanda de transporte carretero para examinar la demanda potencial aérea.

c. Insuficiencia ferroviaria

Aunque en México existen varias compañías ferroviarias éstas transportan en forma marginal pasajeros. Otros países basan parte de su desarrollo en este mercado, integrando grandes ciudades a costos relativamente bajos; por citar solo dos ejemplos, en Europa es el medio de transporte que permite que la gente viaje por diversos países de manera económica y en el caso de Estados Unidos lo une de costa a costa. En México gran parte del desarrollo a principios del siglo XX se debió a la construcción de redes ferroviarias que tuvieron un papel decisivo en la lucha revolucionaria. México es de los pocos países de gran población y extensión que no cuentan con una gran red ferroviaria, actualmente en vez de aumentar la capacidad ferroviaria, esta ha disminuido. El uso de lo que queda de la red es para transporte exclusivo de materia prima y en algunos casos muy particulares para recorridos turísticos. Mientras que en otros países la integración de transporte aéreo con el ferrocarril da dinamismo a la economía, en México se ha optado por fomentar las comunicaciones carreteras dejando al transporte terrestre con este compromiso único dadas sus características de tiempo y costo.

d. Saturación actual y competencia

Si en el transporte de pasajeros el servicio aéreo tiene competencia como ya se planteó anteriormente, respecto a los servicios de carga es aún más grave la situación. Por avión

sólo llega el 2% de la mercancía total a la ciudad, a pesar de que 12 de las 44 líneas aéreas que llegan al AICM están dedicadas exclusivamente a la carga. Explican los expertos que el principal problema del AICM radica en que sus dos pistas se encuentran muy cercanas, lo cual impide maniobras simultáneas de llegada y salida. Respecto a la saturación del aeropuerto, en 2001 recibió 21 millones de pasajeros, a esto se debe añadir el movimiento producido por el personal que trabaja y los más de 52 millones de acompañantes de los viajeros. Se estima que cerca del 2006 el número de operaciones pase de casi 300 mil a 365 mil. Con todo esto, las mejoras y ampliaciones realizadas no bastarán para poder cubrir la demanda solicitada. Actualmente la distribución de los aeropuertos en México es en cuatro grupos regionales: AICM independiente, sureste 9 aeropuertos, Pacífico 12 aeropuertos y Centro Norte 13 aeropuertos. Esto con el fin de que los paquetes formados fueran atractivos para los inversionistas pero sin permitir que hubiera opciones que nadie tomara. Con esta agrupación se reunieron masas críticas que representarían una buena proporción de los pasajeros nacionales e internacionales. Existen pocas ciudades en el mundo con más de 10 millones de habitantes sin salida directa al mar: Moscú, París y México. Una ciudad tan grande como la nuestra, sin el recurso de la transportación marina exige eficientes puertos aéreos y terrestres, y sin embargo, mientras que el transporte terrestre es gigantesco, el aéreo es bastante modesto. Otro ejemplo de este rezago es la central de Abastos de la Ciudad de México, con un abastecimiento simplemente terrestre. Esta central debería estar conectada a un nodo ferroviario o tener una estrecha comunicación aeroportuaria y sin embargo ninguna de las dos cosas sucede.

Recomposición de la demanda

La demanda de servicios aéreos se puede clasificar en tres tipos básicos: de carga, de pasajeros de las empresas y pasajeros de las familias. Como se ha visto, la carga no representa una parte importante de la aviación comercial. Referente a los viajes de pasajeros, la diferencia es que los viajes familiares son más bien estacionales mientras que los generados por las empresas tienen frecuencia durante todo el año.

a. Aumento en la demanda

La demanda de servicios aeroportuarios crece en promedio 5% anual, sin embargo esto no significa que necesariamente el sector se desarrolle o tenga un impulso a la par de esta estimación es decir, mientras se acrecienta el flujo de usuarios, el sector no alcanza a cubrir tales necesidades como vuelos más cortos, aeropuertos alternos, número de aeronaves, etc.

b. Disminución del ingreso

Paradójicamente, mientras más viajes se requieren, no necesariamente más viajeros se incorporan. En México existe un deterioro evidente del ingreso de la población, esto lleva a que el transporte aeroportuario sea de importancia marginal. Sin embargo la concentración del ingreso ha hecho que los viajeros actuales incrementen su frecuencia dando en consecuencia un aumento total de los viajes. La parte del ingreso es fundamental para el análisis de la demanda de servicios aéreos.

Método de análisis para el cálculo de la demanda

Aunque el autor del presente trabajo no participó en esta fase fundamental del proyecto, es conveniente explicar a grandes rasgos el proceso metodológico empleado para obtener este parámetro. Las técnicas utilizadas para la determinación de la demanda empelada por el grupo que se encargó de esta tarea pertenecen al campo de análisis geoestadístico. La metodología desarrollada por este grupo de trabajo partió del método de cribas (sobreposición de mapas empelando operaciones de análisis espacial en un SIG), complementado con análisis de datos geoestadísticos, principalmente pruebas de desviación estándar, análisis de correlación y resumen de variables por análisis factorial. El método de cribas consiste en separar los fenómenos gráficamente para confrontarlos y analizar cuando las variables se relacionan. Este tipo de análisis permitió sobreponer los dos fenómenos básicos en el estudio: la oferta y demanda y el fenómeno de distribución de viajeros actuales y potenciales para este sector de la aviación, describiendo comportamientos que permitieran definir las características más importantes y poder así proyectar rutas alternas.

Con el fin de que la investigación tuviese un grado razonable de confiabilidad científica, fue necesario agregar pruebas de corte estadístico que permitieron explicar los comportamientos encontrados bajo un razonamiento de control o revisión. Estas fueron medias y desviaciones, procesos que facilitaron la búsqueda de variables implicadas (como pasajeros, vuelos realizados y otras referencias) con el fin de conocer el tamaño ideal que tendría una muestra representativa de todos los viajeros en la zona estudiada. El análisis de correlación fue utilizado para identificar que variables se afectan, por ejemplo si la frecuencia de los viajeros se correlaciona mucho con el ingreso, podremos inferir parcialmente que el ingreso ayuda a que la gente viaje. El análisis de correlación es una prueba que permite calificar la relación que guarda el comportamiento de una variable con respecto a otra. El análisis factorial se refiere a resumir las variables que pueden resultar involucradas con la generación de viajes. Por ejemplo, podemos encontrar donde están las zonas que contienen más población con el perfil que se necesita para ser un viajero. Para los diversos análisis factoriales llevados a cabo en este trabajo, este equipo utilizó algoritmos provenientes del paquete SPSS: análisis de componentes principales y de valores propios.

4.2 Delimitación del área de estudio

El análisis regional lleva a la definición de áreas de servicio de los aeropuertos. Las fuentes utilizadas en el análisis como información base para este análisis en su mayoría fue información disponible en formato digital, considerando características de precisión, temporalidad y consistencia lógica, referentes a su estructura y contenido general, para su introducción, manejo y análisis en el SIG. Éstas fueron:

1. Marco Geoestadístico con la delimitación estatal y municipal del INEGI y la localización puntual de las localidades elaborado para el XII Censo General de Población y Vivienda del 2000.
2. Red de carreteras pavimentadas del Inventario Nacional de Infraestructura del Transporte que realiza el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) con sistemas de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés). Esta base cartográfica contiene la información de la red carretera actualizada a 2004 donde cada segmento

tiene información asociada referente a: jurisdicción (federal, estatal, municipal), tipo de camino (libre o de cuota), número de carriles y la velocidad máxima de circulación.

3. Los SIG utilizados fueron ArcView y MapInfo.

Cálculo de las áreas de influencia de cada aeropuerto

En este estudio se consideró que el área de influencia de un aeropuerto a escala regional es el número de unidades territoriales servidas con el criterio de minimización del tiempo de acceso por vía terrestre (vea la figura 4.3). Como puede observarse, esta primera fase corresponde a un problema de rutas óptimas “*todos a uno*”.

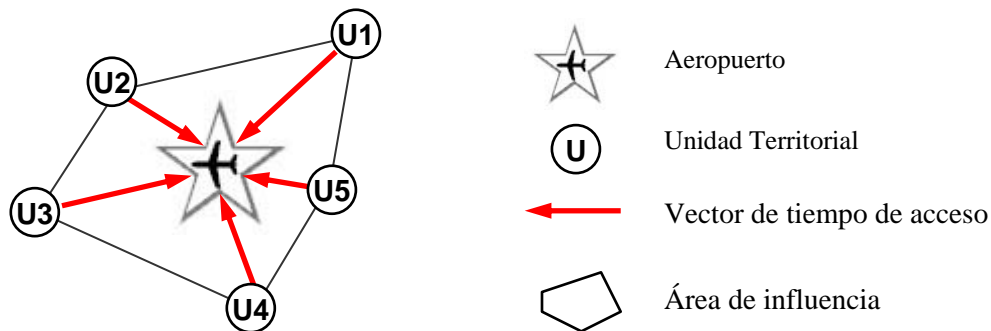


Figura 4.3 Representación del área de influencia de un aeropuerto.
Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de determinar 1) las unidades territoriales que corresponden al *área de influencia* de cada aeropuerto y 2) las unidades territoriales *indiferentes* (por encontrarse en el mismo rango de tiempo a dos o más aeropuertos), fue necesario además de considerar los aeropuertos localizados dentro de la región centro de México¹, los aeropuertos adyacentes². En la siguiente (4.4) figura se representa el planteamiento de este sistema espacial.

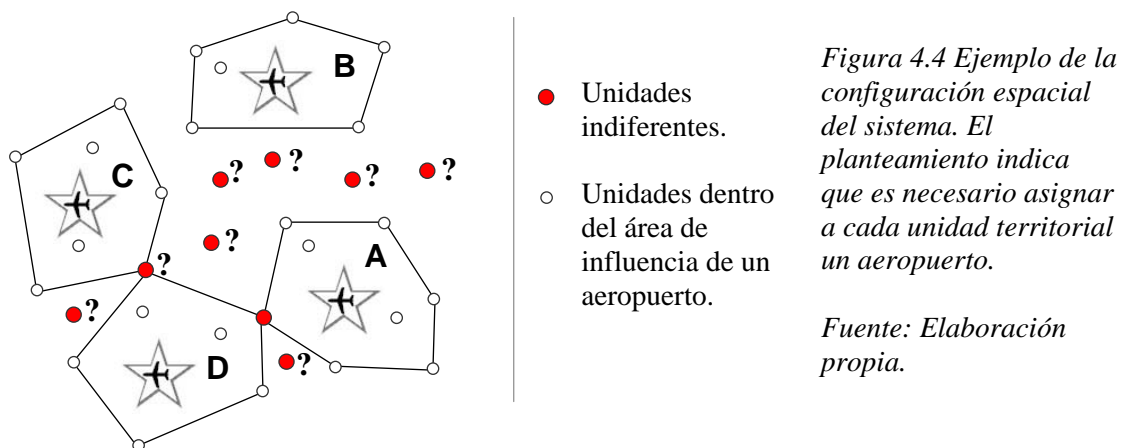


Figura 4.4 Ejemplo de la configuración espacial del sistema. El planteamiento indica que es necesario asignar a cada unidad territorial un aeropuerto.

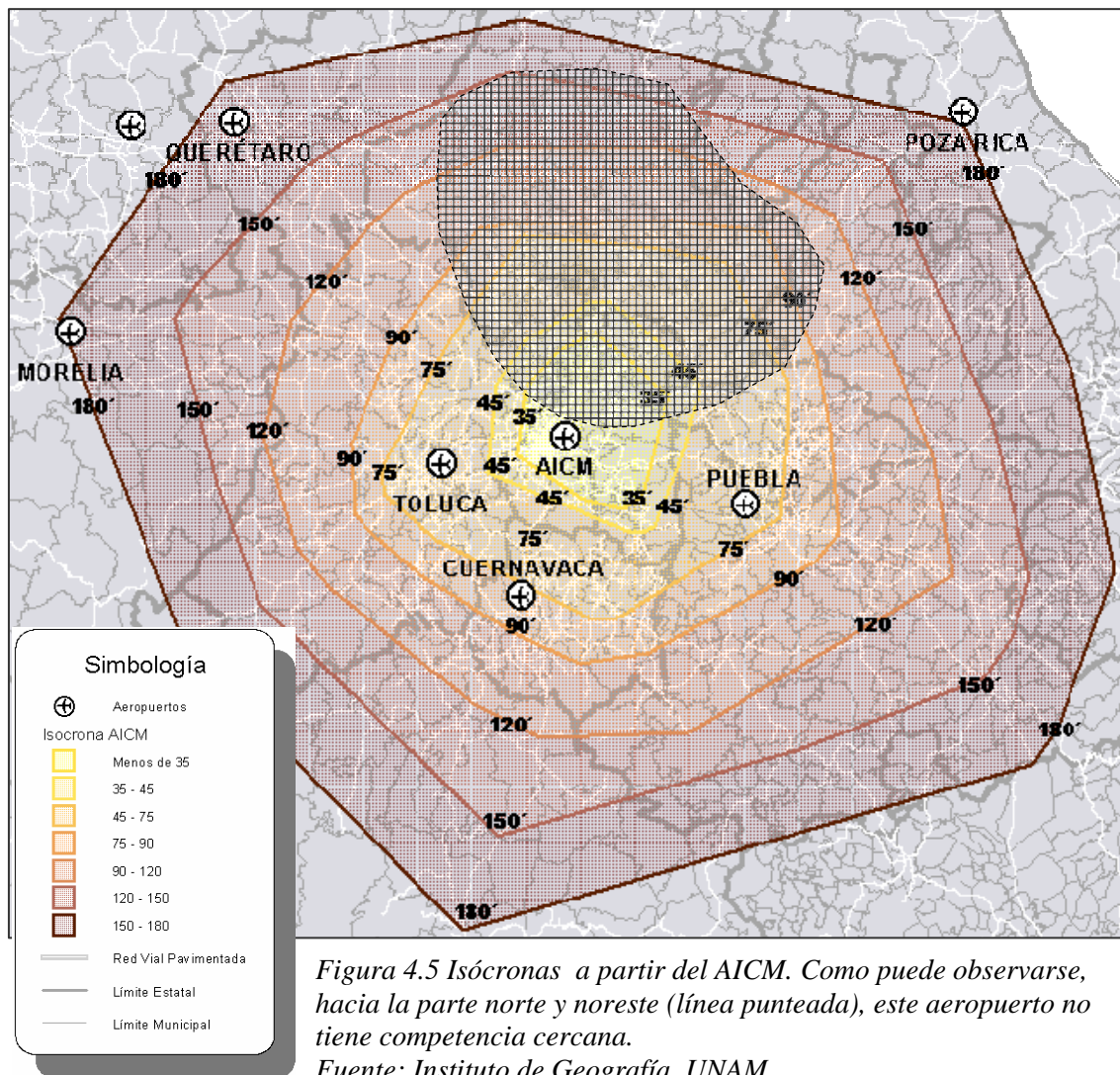
Fuente: Elaboración propia.

¹ Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), Toluca, Cuernavaca, Querétaro y Puebla.

² Acapulco, Bajío, Morelia, Oaxaca, Poza Rica, Querétaro, San Luis Potosí y Veracruz.

Para determinar la configuración espacial del sistema, se realizó un análisis de isocronas³ e isodápanas⁴ con ayuda de un SIG. Cada isocrona tuvo un aeropuerto como origen y a partir de las impedancias de los arcos se construyeron las áreas de servicio. Para obtener la impedancia de los arcos de la red se utilizó la longitud y velocidad, datos obtenidos del Inventario Nacional de Infraestructura del Transporte (IMT, 2002). Cabe destacar que sólo fueron consideradas las vías pavimentadas. Vea la figura 4.5 y siguientes.

El criterio para determinar el área de influencia máxima fueron tres horas de recorrido (isocrona máxima). Esta delimitación se realizó considerando exclusivamente los tiempos de desplazamiento. No se ponderó la oferta de los servicios aéreos con el modelo de Converse⁵ porque la jerarquía del AICM ocultaría la participación del resto de los aeropuertos considerados. El modelo espacial de isocronas en esta etapa del estudio servirá para identificar las localizaciones en competencia de los servicios aeroportuarios de la región centro de nuestro país.



³ Vea en el capítulo 3 “Tiempos de viaje entre zonas y elección de rutas”.

⁴ Vea el capítulo 1 “Localización del punto de costes mínimos de transporte”

⁵ Vea en el capítulo 2 “Modelos de posición”.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Se muestra a continuación los análisis de isócronas para el aeropuerto de Toluca.

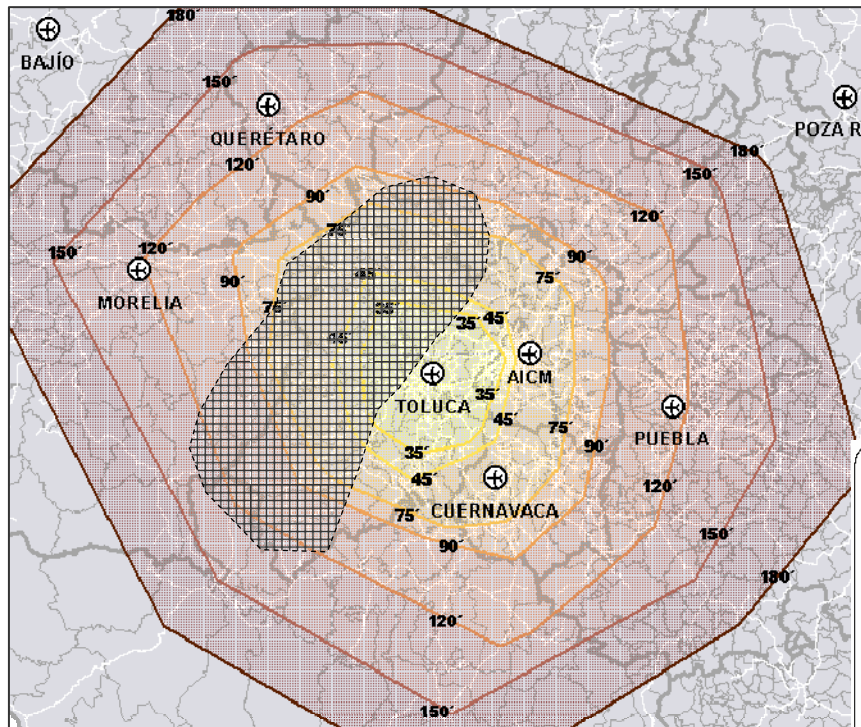
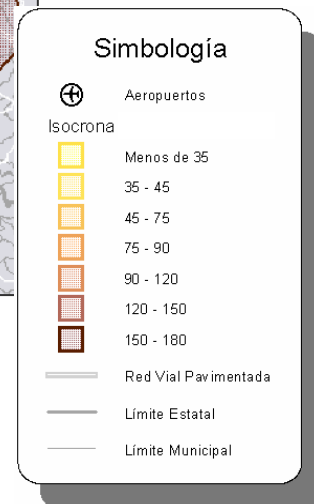


Figura 4.6 Isócronas a partir del Aeropuerto de Toluca. Como puede observarse, ofrece buena accesibilidad a la mayor parte de las localizaciones donde el AICM no tiene competencia. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.



En las figuras 4.5 y 4.6, la zona sombreada indica buenos tiempos de accesibilidad terrestre al aeropuerto y la inexistencia de competencia.

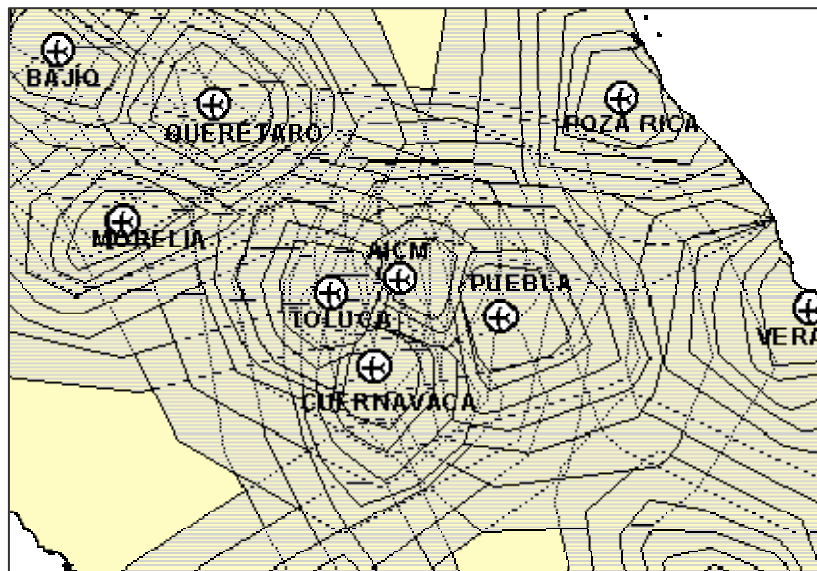


Figura 4.7 Isócronas para cada aeropuerto de la zona en estudio. La intersección de las isócronas con igual tiempo conforman las isodápanas. Debido a que resulta complejo analizar las diversas áreas de servicio en su conjunto, es necesario simplificar el resultado.

Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

En la figura anterior (4.7) es difícil hacer una interpretación por lo que se hizo una simplificación mediante operaciones básicas en el SIG de unión y resta de polígonos. El resultado se muestra en la siguiente figura (4.8) que proporciona una primera imagen sobre

la cobertura territorial del servicio aeroportuario en esta región. Este resultado es una analogía del análisis de *isodápanas* para determinar los lugares de igual costo.

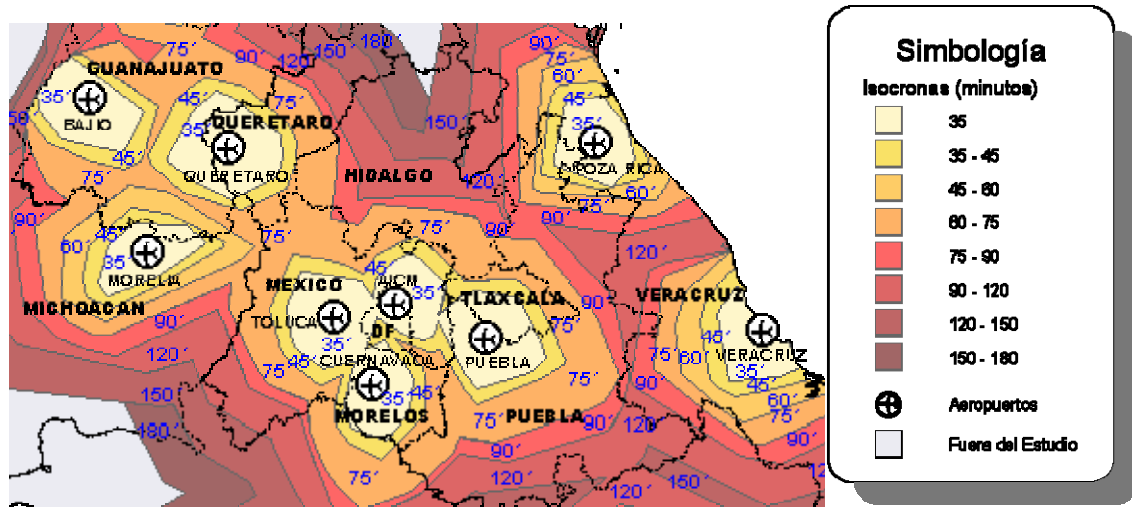


Figura 4.8 Mapa simplificado a partir de las isócronas de cada aeropuerto. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

Durante esta fase del análisis, se hizo un hallazgo: el intervalo de tiempo en el que la mayor parte de los aeropuertos de esta región entran en competencia es de los 46 a los 90 minutos. Esta aseveración se hace considerando la hipótesis de este trabajo: el tiempo de acceso es el factor principal en la decisión del usuario. Dicho en otras palabras, todos aquellos usuarios que se encuentren a menos de 45 minutos de un aeropuerto lo seleccionarán, suponiendo que todos ofrecen los mismos servicios. Por lo tanto se considera que las unidades territoriales de indiferencia son aquellas comprendidas después de los 45 minutos.

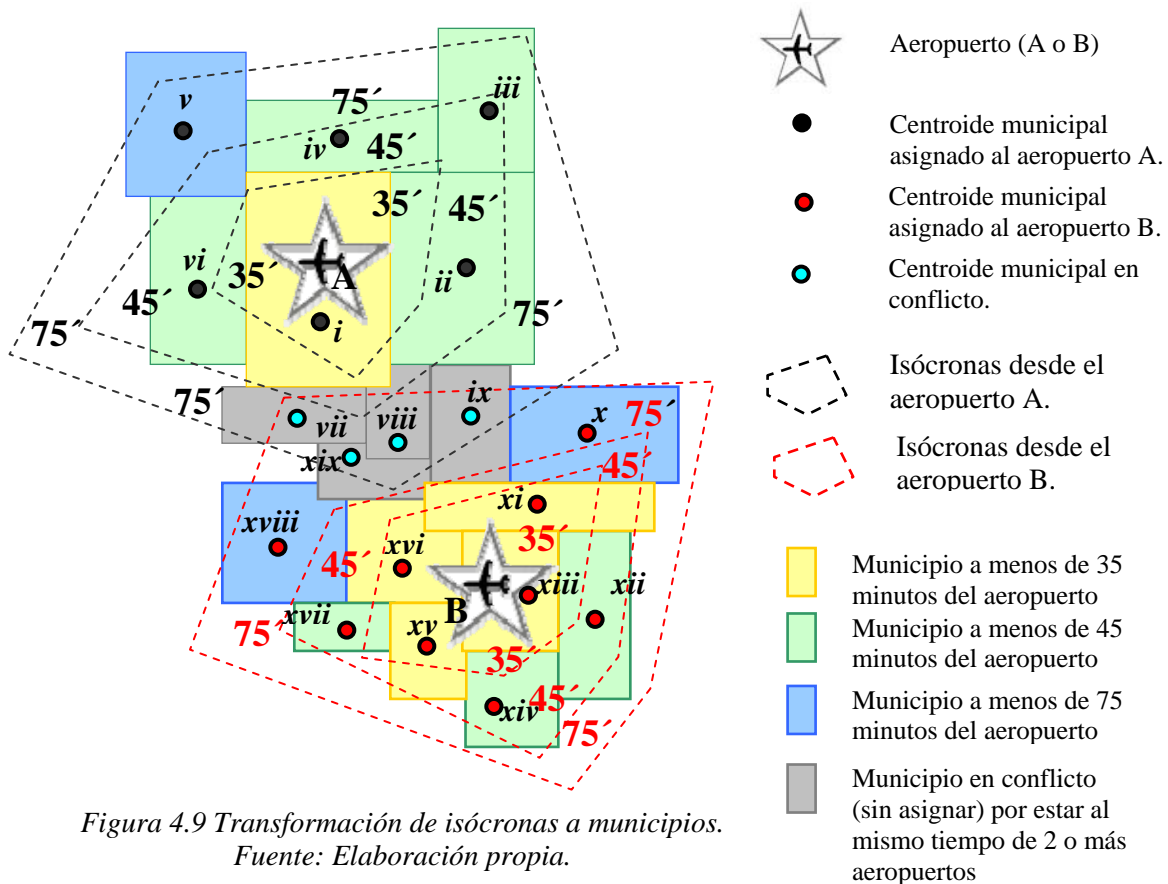
Tomando en cuenta el resultado simplificado, se procedió a transformar las áreas de influencia de cada aeropuerto en unidades territoriales municipales. Este criterio tuvo la finalidad de hacer compatible la información generada con todas las variables socioeconómicas que el INEGI proporciona en sus bases de datos públicas.

El criterio de asignación para considerar que un municipio pertenece a cierta área de influencia de un aeropuerto fue mediante la inserción del centroide geométrico municipal y una operación espacial básica de punto en polígono: contenido en⁶.

Pudo optarse por utilizar las cabeceras municipales o las localidades con mayor número de habitantes en lugar de los centroides geométricos, sin embargo la georreferenciación hecha por INEGI tiene errores considerables pues existen casos en que tanto las cabeceras como las localidades están desplazadas y se encuentran en municipios que no les corresponden. En la siguiente figura (4.9) se muestra el planteamiento espacial del problema que permitió desarrollar un procedimiento de asignación para delimitar los municipios que conforman el área de influencia de cada aeropuerto.

⁶ En el ámbito de los SIG, también se le conoce como *unión espacial* (spatial join).

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO



En la figura anterior (4.9) se muestran las unidades territoriales en competencia (isodápanas) con color gris con sus respectivos centroides en azul (*vii*, *viii*, *ix* y *xix*) obtenidos al identificar cruces de isócronas⁷ con valores iguales (para todos los casos a 75 minutos) a partir de los aeropuertos A y B. Aquellas unidades territoriales que no tienen conflictos tienen un color según el rango de tiempo al que se encuentran de cualquiera de los dos aeropuertos (menos de 35 minutos-amarillo, menos de 44 minutos-verde y menos de 75 minutos en azul).

Al analizar 2 aeropuertos siguiendo este procedimiento, el resultado es identificable a simple vista, sin embargo al tener un conjunto de 3 o más, el proceso se complica, es por ello que el uso de sistemas de información geográfica como apoyo al análisis se vuelve indispensable con la finalidad de ganar tiempo y precisión.

En la siguiente figura (4.10) se muestra una porción del análisis realizado para identificar los municipios en conflicto de elección de un aeropuerto. Se muestran las isócronas simplificadas (líneas en color negro), los centroides geométricos municipales calculados previamente en el SIG y los municipios según el rango de accesibilidad a los aeropuertos (con la leyenda de tiempo de acceso en color azul).

⁷ Cabe recordar que las isócronas son modelos espaciales que son generados al considerar las impedancias de una red (en este caso la red vial pavimentada).

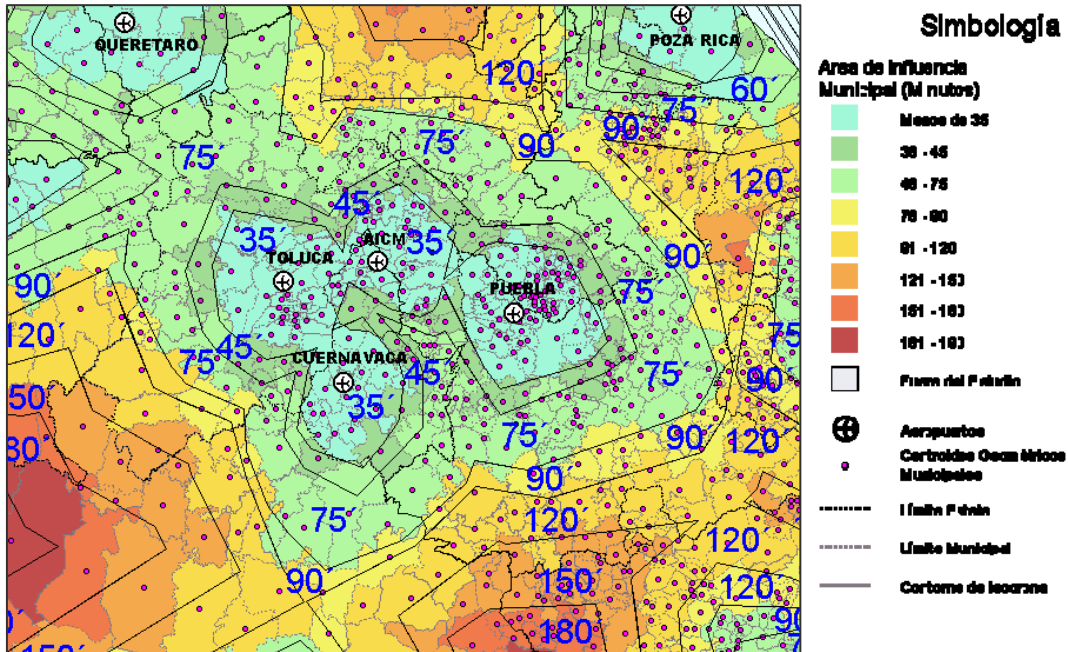


Figura 4.10 Procedimiento de conversión de isodapanas municipales utilizando centroides geométricos. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

La siguiente figura (4.11) muestra el resultado de las isócronas simplificadas convertidas en municipios.

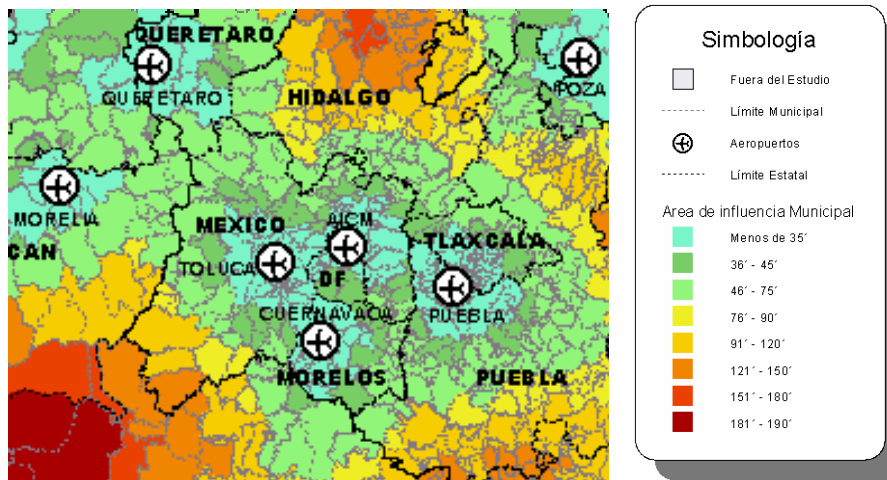


Figura 4.11 Isócronas municipales con origen en los aeropuertos.

Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

Resumiendo, la fase de asignación consistió en identificar cuantos municipios son servidos por cada aeropuerto buscando *minimizar el tiempo de acceso de los usuarios*. Aquellos municipios que registraron igual tiempo para dos o más aeropuertos se les denominó “en conflicto” utilizando el principio de las isodápanas. Con ayuda de una matriz de asignación (tabla 4.1) en el SIG se pudo realizar este proceso. La matriz de asignación se elaboró mediante una configuración binaria e incluye las alternativas que tiene cada municipio de acceder a un aeropuerto (valor 1). En caso de no existir opción la celda tiene valor de 0. Los municipios en conflicto son aquellos que registran el mismo intervalo de

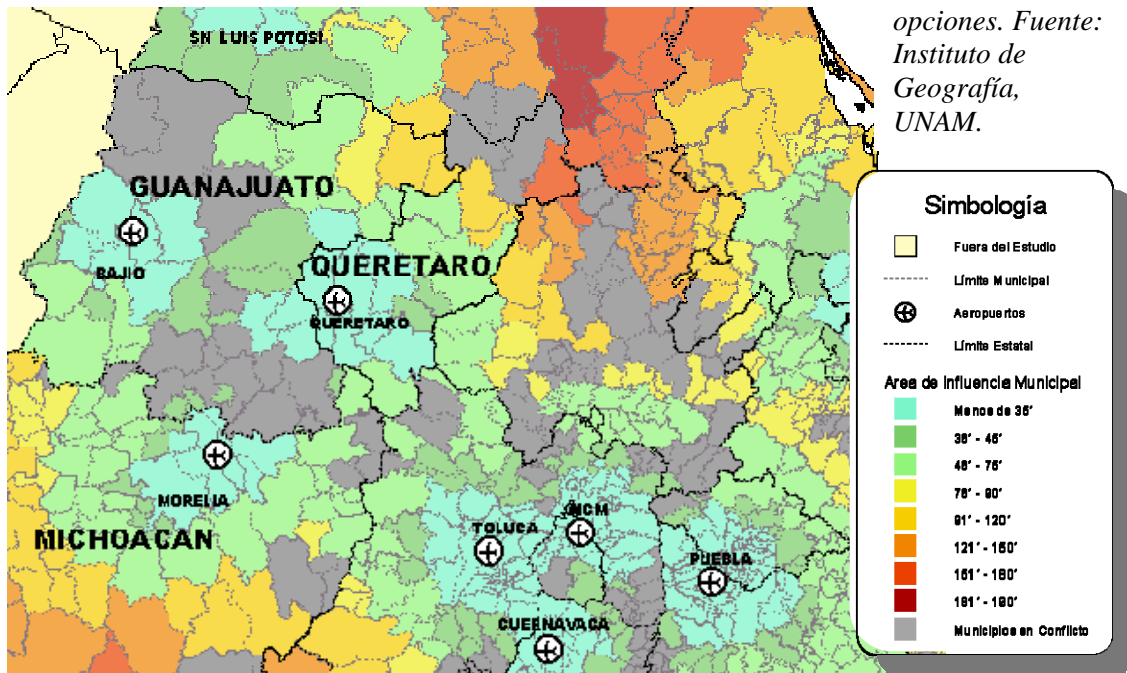
4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

tiempo para dos o más aeropuertos (vea el caso de los centroides *vii*, *viii*, *ix* y *xix* en la figura 4.9). A continuación se muestra un ejemplo de una matriz de asignación para identificar isodápanas utilizando los datos de la figura 4.9.

Centroide	Aeropuerto A			Aeropuerto B			Conflicto
	<=35'	36-45'	46-75'	<=35'	36-45'	46-75'	
<i>i</i>	1	0	0	0	0	0	0
<i>ii</i>	0	1	0	0	0	0	0
<i>iii</i>	0	1	0	0	0	0	0
<i>iv</i>	0	1	0	0	0	0	0
<i>v</i>	0	0	1	0	0	0	0
<i>vi</i>	0	1	0	0	0	0	0
<i>vii</i>	0	0	1	0	0	1	1
<i>viii</i>	0	0	1	0	0	1	1
<i>ix</i>	0	0	1	0	0	1	1
<i>x</i>	0	0	0	0	0	1	0
<i>xi</i>	0	0	0	1	0	0	0
<i>xii</i>	0	0	0	0	1	0	0
<i>xiii</i>	0	0	0	1	0	0	0
<i>xiv</i>	0	0	0	0	1	0	0
<i>xv</i>	0	0	0	1	0	0	0
<i>xvi</i>	0	0	0	1	0	0	0
<i>xvii</i>	0	0	0	0	1	0	0
<i>xviii</i>	0	0	0	0	0	1	0
<i>xix</i>	0	0	1	0	0	1	1

Tabla 4.1 Matriz de asignación del ejemplo de la figura 4.14.
Fuente: Elaboración propia.

Abajo: Figura 4.12 Isodápanas: en gris se representan los municipios con más de dos opciones. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.



Reasignación de municipios con aeropuertos en competencia

Una vez que se identificaron los municipios de la zona en estudio que corresponden a cada aeropuerto por registrar los menores tiempos de acceso y se localizaron aquellos municipios que se encuentran en conflicto (isodápanas en negro en la figura siguiente, 4.13), para el desempate se utilizaron los siguientes criterios provistos por la SCT: la política de descentralización de los servicios aéreos del AICM, la utilización de localidades con población considerable en lugar de los centroides geométricos de los municipios, la pertenencia estatal de los municipios por considerar que tienen mayor identificación con el aeropuerto de su estado y la estructura de la red carretera (dando prioridad a las vialidades que brindan mayor seguridad y comodidad).

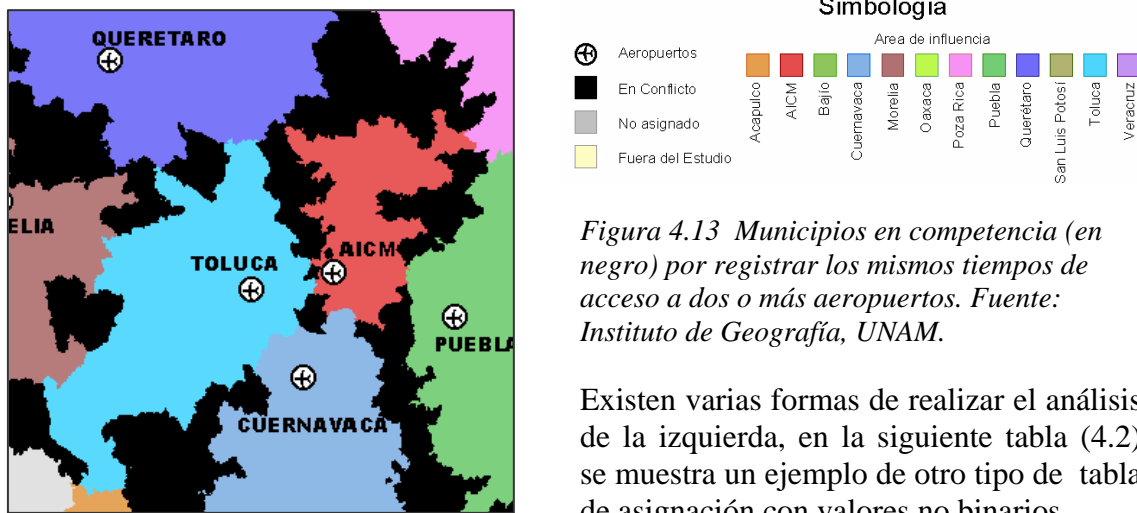


Figura 4.13 Municipios en competencia (en negro) por registrar los mismos tiempos de acceso a dos o más aeropuertos. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

Existen varias formas de realizar el análisis de la izquierda, en la siguiente tabla (4.2) se muestra un ejemplo de otro tipo de tabla de asignación con valores no binarios.

ESTADO	MUNICIPIO	POBLACION	TOLUCA	QRO	PUEBLA	POZA RICA	AICM	ASIGNADO	TIEMPO
HIDALGO	ACATLAN	18,619	150	0	120	120	120	PUEBLA	120
HIDALGO	ACTOPAN	46,010	150	150	120	150	120	PUEBLA	120
HIDALGO	ATOTONILCO EL GRANDE	25,423	150	0	120	150	120	PUEBLA	120
HIDALGO	CUAUTEPEC DE HINOJOSA	45,110	150	0	90	120	90	PUEBLA	90
HIDALGO	HUASCA DE OCAMPO	15,308	150	0	120	150	120	PUEBLA	120
HIDALGO	METEPEC	10,200	150	0	120	120	120	PUEBLA	120
HIDALGO	SAN AGUSTIN METZQUITLAN	8,803	0	0	150	150	150	PUEBLA	150
HIDALGO	METZTITLAN	20,599	0	0	150	150	150	PUEBLA	150
HIDALGO	MINERAL DEL CHICO	7,013	150	0	120	150	120	PUEBLA	120
HIDALGO	SANTIAGO DE ANAYA	13,582	150	150	150	0	120	PUEBLA	150
HIDALGO	SANTIAGO TULANTEPEC DE LUGO GUERRERO	26,254	150	0	90	120	90	PUEBLA	90
HIDALGO	TULANCINGO DE BRAVO	122,274	150	0	120	120	90	PUEBLA	120

Tabla 4.2 Ejemplo de municipios en conflicto y su respectiva asignación. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

En el siguiente mapa de la figura 4.14 se muestran las áreas de servicio con los municipios en competencia reasignados. Para el caso del área de influencia del aeropuerto de Toluca, según este análisis y los criterios de la SCT, se desempataron para el Estado de México: Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Tultitlán, Tlalnepantla, así como las Delegaciones del Distrito Federal: Magdalena Contreras, Coyoacán, Tlalpan, Cuajimalpa y Miguel Hidalgo.

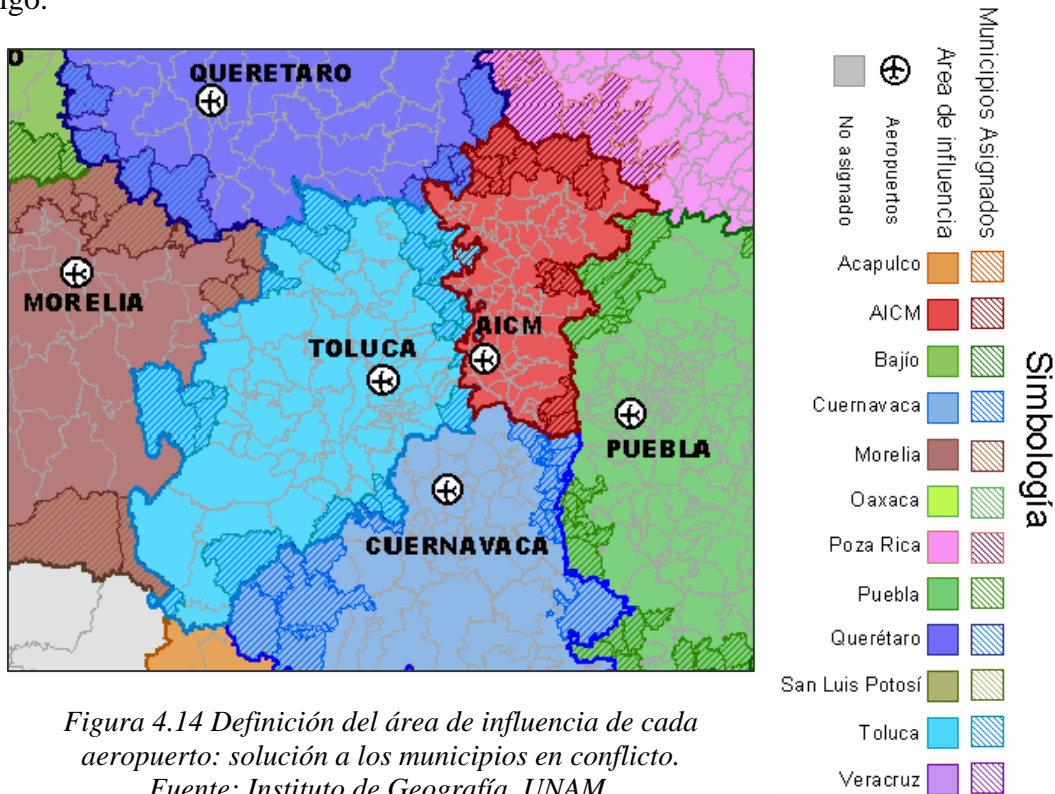


Figura 4.14 Definición del área de influencia de cada aeropuerto: solución a los municipios en conflicto.
Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

En la siguiente tabla (4.3) se muestra un resumen de los municipios correspondientes a cada aeropuerto con su respectiva población.

AEROPUERTO	MUNICIPIOS	POBLACION
ACAPULCO	33	1,897,425
AICM	78	15,295,419
BAJIO	19	2,982,911
CUERNAVACA	60	2,677,870
MORELIA	87	3,338,749
OAXACA	378	1,555,452
POZA RICA	117	2,983,859

AEROPUERTO	MUNICIPIOS	POBLACION
PUEBLA	262	5,740,812
QUERETARO	54	3,030,533
SAN LUIS POTOSI	37	1,645,353
TOLUCA	93	7,020,783
VERACRUZ	176	4,618,360
NINGUNO	229	4,524,372

Tabla 4.3 Resumen de los municipios asignados a cada aeropuerto.
Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

El cálculo de la población total fue realizado en el SIG empleando información oficial de INEGI proveniente del censo del año 2000.

Puesto que el objetivo principal del presente capítulo es mostrar la aplicación del modelo gravitacional para el diseño de rutas de transporte público, a partir de este momento sólo se hará referencia al análisis realizado para el Aeropuerto de Toluca y el AICM.

Área de servicio del AICM

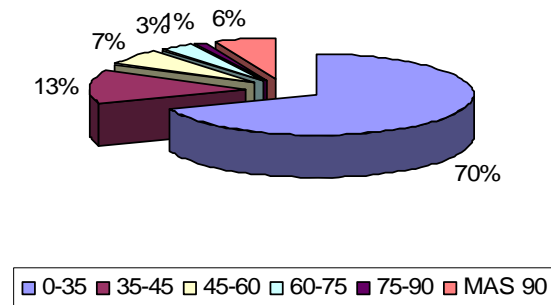
A continuación se muestra una tabla resumen (tabla 4.4), una gráfica (gráfica 4.1) y un mapa (figura 4.15) con la información sintetizada del área de influencia del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.

ÁREA DE SERVICIO DEL AICM					
ENTIDADES	NÚMERO DE MUNICIPIOS	NÚMERO DE HABITANTES	ÁREA EN Km2	DENSIDAD HAB/KM2	KM DE VIALIDADES
DF	10	6,513,753	607.7	122,736	136.1
HIDALGO	29	915,534	5063.3	6,998	882.2
MÉXICO	39	5,989,452	3965.4	84,158	984.4
TOTAL	78	13,418,739	9636.3	1,393	2002.7

Tabla 4.4 Síntesis municipal del área de influencia del AICM.
Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

1. Para el cálculo de la población se sumó el número de habitantes registrados a nivel municipal.
2. El área se estimó considerando la superficie de los municipios que integran cada área de servicio.
3. La densidad de población se calculó dividiendo la población entre los kilómetros cuadrados de cada área de servicio.
4. Los kilómetros de vialidades se calcularon intersectando topológicamente la cobertura de caminos con la cobertura municipal.

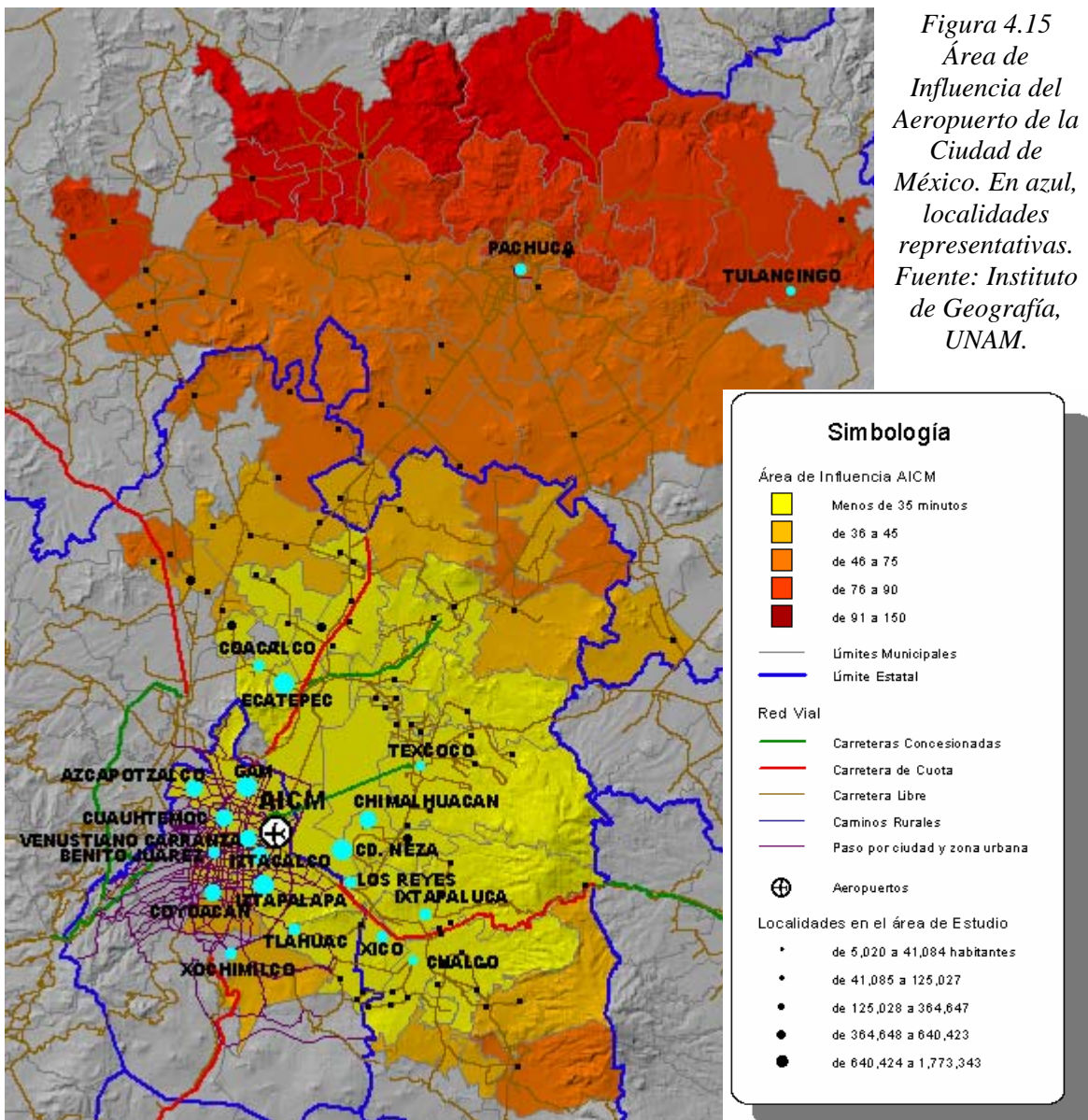
PORCENTAJE DE POBLACION POR RANGO DE ISOCRONA, AICM



Gráfica 4.1 Se observa que el 70% de la población total contenida en el área de influencia del AICM se encuentra en los municipios con tiempo menor a los 35 minutos de acceso. Es de notar que esto no implica que los usuarios actuales y potenciales del servicio estén dentro de ese rango, sino es indicador de la alta densidad de población en esa parte de la ciudad de México. Cuestión que no es favorable al servicio.

Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

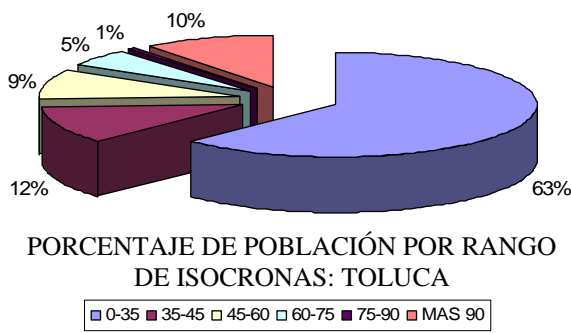


Área de servicio del aeropuerto de Toluca

De igual forma que con el AICM se muestra la información obtenida de este aeropuerto.

ÁREA DE SERVICIO DEL AEROPUERTO DE TOLUCA					
ENTIDADES	NÚMERO DE MUNICIPIOS	NÚMERO DE HABITANTES	ÁREA EN Km2	DENSIDAD HAB/KM2	KM DE VIALIDADES
MÉXICO	75	6,955,179	17158.7	405	3704.5
MICHOACÁN	6	205,977	2149.5	96	202.1
DF	5	1,994,713	583.0	3422	173.7
GUERRERO	4	96,525	2219.2	43	149.3
HIDALGO	3	179,546	810.0	222	181.9
TOTAL	93	9,431,940	22920.5	412	4411.5

Tabla 4.5 Síntesis municipal del área de influencia del Aeropuerto de Toluca. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.



Gráfica 4.2 Se observa que el 63% de la población total contenida en el área de influencia del Aeropuerto de Toluca se encuentra en los municipios con tiempo menor a los 35 minutos de acceso. En segundo orden de importancia se encuentra la población municipal contenida en el intervalo de 35 a 45 minutos.

Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

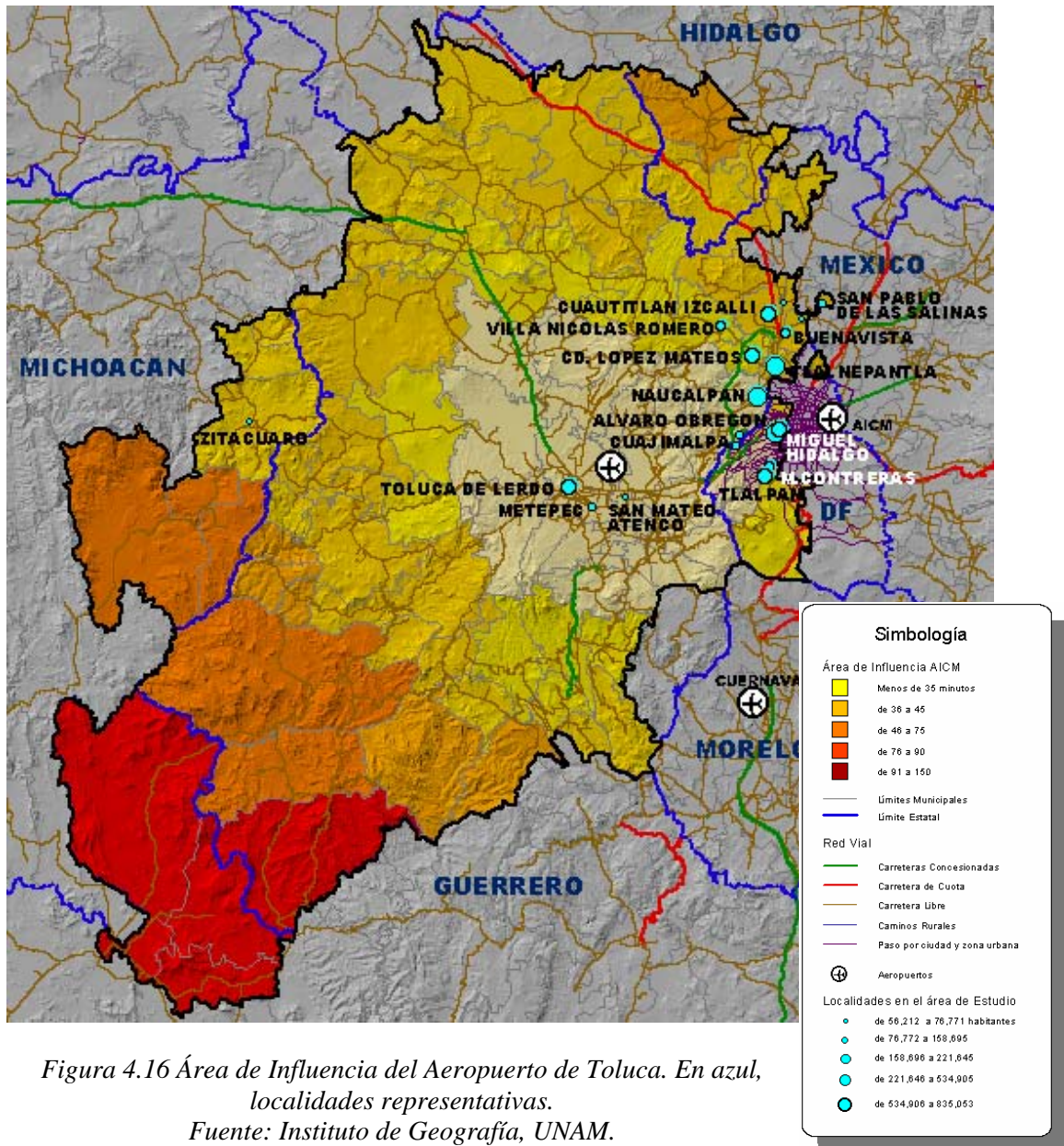


Figura 4.16 Área de Influencia del Aeropuerto de Toluca. En azul, localidades representativas.

Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

4.3 Evaluación del mercado potencial de usuarios

Como se mencionó anteriormente en el apartado de método de análisis para el cálculo de la demanda, esta fase del proyecto fue realizada por otro grupo de investigación involucrado en el proyecto de investigación. La demanda se dividió entre la demanda *actual* y la *potencial*, sobre el entendido de usuario actual aquel que ha utilizado el avión como una opción en sus viajes y además viaja, aunque sea con una frecuencia baja. El usuario potencial será aquel que viaja y que no ha utilizado el avión nunca. Para obtener el perfil del usuario se realizaron análisis que permitieran identificar las características más importantes que podrían determinar la capacidad o la probabilidad de alguien a ser viajero. Para identificar las características específicas y de mayor frecuencia de los usuarios encuestados en el AICM, se debe tomar en cuenta, solo el conjunto de variables que tengan una contraparte, lo más parecida posible en la población general o abierta del territorio a estudiar. Por ello, queda claro que el perfil que se obtuvo esta en función del acceso a información similar a las variables recopiladas en las encuestas levantadas para este fin.

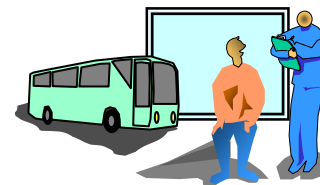
Encuesta a viajeros actuales (aéreos)

Para el análisis de los viajeros actuales se utilizó una encuesta llevada a cabo por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes dentro de la terminal aérea de la Ciudad de México. Fue útil para saber como son los viajeros actuales bajo el supuesto de que el viajero actual seguirá siéndolo.



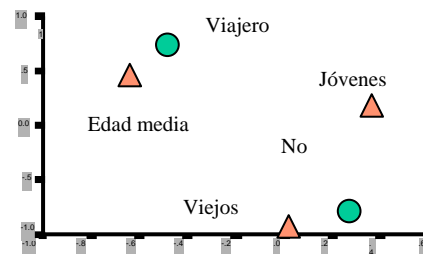
Encuesta a viajeros potenciales (terrestres)

Debido a que no se puede tener un análisis completo de la demanda si no se tiene información de aquellos que se incorporarían a la masa de consumo en caso de que algunos aspectos de la oferta cambiaran, se llevó a cabo una encuesta a los viajeros potenciales en las terminales de autobuses y estuvo a cargo de la Universidad Nacional Autónoma de México.



Se definió de la encuesta SCT un perfil empleando un método de combinación de variables utilizando análisis factorial. Posteriormente se resumió esta información por medio de estadística gráfica multivariada que permitió la comprensión de las principales diferencias entre viajero y no viajero.

Para identificar si existe relación entre algunas de las variables analizadas con la frecuencia a viajar se utilizó el análisis de correspondencia, que es una técnica multivariada donde se grafican dos dimensiones que permiten ver las relaciones (no necesariamente en forma lineal) entre grupos de variables. El análisis de correspondencia permitió graficar decenas de cruces de variables, por ejemplo podemos tener en una gráfica el perfil de viajero contra edad, para identificar que los viajeros que más viajan son en su mayoría de edad media y los no viajeros pueden ser más jóvenes o viejos, similar a la que se muestra en la imagen de la derecha.



Resultados de la encuesta SCT

La variable de principal interés es la frecuencia de viaje pues con ella se conoce la predisponibilidad de una persona a viajar. A continuación se mencionan los aspectos relevantes obtenidos por el grupo de investigación que se encargó de analizar esta información:

Edad. Se aprecia que las personas que viajan menos coinciden con los grupos *muy jóvenes*. Mientras que los *menos jóvenes* están más cerca de no viajar. En el grupo de los *jóvenes* están las frecuencias altas. Este resultado permite deducir que existe cierta relación -aunque no perfecta- de que a mayor cercanía con la edad productiva mayor frecuencia en los viajes.

Ingreso. Respecto al ingreso también ocurre la relación de a *mayor frecuencia de viaje mayor ingreso*. Sin embargo estas relaciones tienen límites pues cuando el ingreso sube demasiado puede encontrarse una frecuencia un poco menor a la que le correspondiera de ser la relación perfecta. Se aprecia que a mayor ingreso más viajes.

Nivel Educativo. Es clara la relación del nivel educativo y la probabilidad de viajar. En el grupo de *preparación media* se observan frecuencias medias y en la *menor preparación* los viajeros primerizos. La educación es una de las variables que se relacionan con mayor claridad con la capacidad y necesidad de viajar.

Motivo de viaje. La frecuencia se encuentra ampliamente relacionada con el motivo principal que induce a una persona a hacer los viajes. Se observa como existe alta frecuencia de viajes con motivos de negocios y trabajo, mientras que se presentan frecuencias bajas en los viajes con motivo de estudio, y las frecuencias medias a turismo. Lo anterior se puede explicar de la siguiente manera: los estudiantes que viajan, por lo regular lo hacen en períodos regulares, ya sea porque comienzan o acaban un ciclo escolar o eventualmente van a fiestas familiares o eventos importantes (nacimiento de un miembro de la familia, enfermedad de algún miembro o muerte), el turismo generalmente no tiene frecuencias altas pues se hacen viajes unas cuantas veces al año, en cambio el trabajo y los negocios tienen grandes posibilidades de presentarse a lo largo del año. La frecuencia también se da más en la gente que viaja sola, y evidentemente esto se relaciona con el motivo del viaje. La variable de motivo de viaje no se utilizó para definir el perfil de usuario porque no hay forma de prever en la base de datos de la muestra censal, es decir, es un factor presente pero no indispensable, por ejemplo, el hecho de que alguien estudie no implica que por ello viaje.

Resumen de perfil

De lo anterior se obtuvo que las mejores variables replicables en el censo, para predecir la probabilidad de viajar son: *ingreso*, *edad* y *nivel educativo*. El perfil de usuario se resume en el siguiente cuadro (tabla 4.6) donde se aprecia cuales son las variables que indican mayor probabilidad de viajar.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

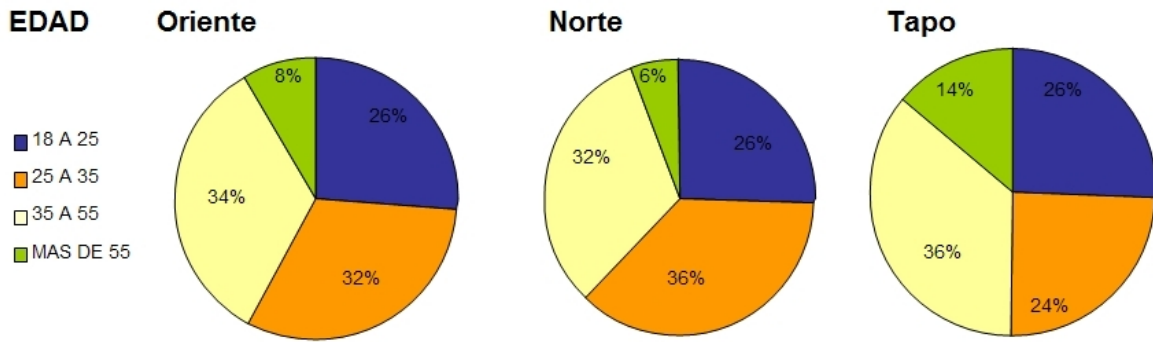
VARIABLE	GRUPO A	GRUPO B	GRUPO C
EDAD	Los de mayor edad, en promedio 45 años. Casos extremos 22 y 62 años.	Los más jóvenes, en promedio 33 años. Casos extremos 18 y 50 años.	Edad intermedia, en promedio 41 años. Casos extremos 30 y 62 años.
INGRESO	Los de mayor ingreso, en promedio \$38,000.	Ingresos intermedios, en promedio \$16,000.	Bajos ingresos, en promedio \$9,000.
ESTUDIOS	Los de mayor nivel de estudios: el 61% posee licenciatura completa. El 6% tiene doctorado y 23% maestría.	Nivel de estudios importante: el 53% posee licenciatura completa. El 2% tiene doctorado, el 23% maestría.	Contraste en el nivel de estudio. El 43% tiene licenciatura incompleta. El 21% posee maestría o diplomado.
AUTOMÓVIL	Si poseen (100%).	Si poseen (100%).	No poseen (71%).
HABITACIONES	En promedio 5 (58%).	En promedio 4 (84%).	En promedio 4.
FRECUENCIA DE VIAJE	Frecuencia intermedia. El 32% realiza el viaje entre 2 y 5 veces al año. Sólo el 3% entre 5 y 10, y el 6.5 más de 10 veces. 29% realiza el viaje menos de una vez al año y el 23% por primera vez.	Los que más viajan. El 30% realiza el viaje entre 2 y 5 veces al año. El 11.6% entre 5 y 10 y el 7% más de 10 veces. 28% realiza el viaje menos de una vez al año y el 23% por primera vez.	Los que menos viajan. El 14.3% realiza el viaje entre 2 y 5 veces al año. El 7.1% entre 5 y 10 y el 7.1% más de 10 veces. 14.3% realiza el viaje menos de una vez al año y el 57% por primera vez.
MOTIVO DE VIAJE	Los que más viajan por vacaciones y turismo (77.4%) y por trabajo (19.4%).	Los que más viajan por trabajo (44.2%), turismo (46.5%), congresos (4.7%).	Cuando viajan lo hacen por vacaciones/turismo (43%), por trabajo (28.6%) y visitas familiares (21.4%).
NÚMERO DE CASOS	31	43	14
%	35.23	48.86	15.91

Tabla 4.6 Resumen del perfil de usuario obtenido de la encuesta en el AICM. Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Resultados de la Encuesta UNAM

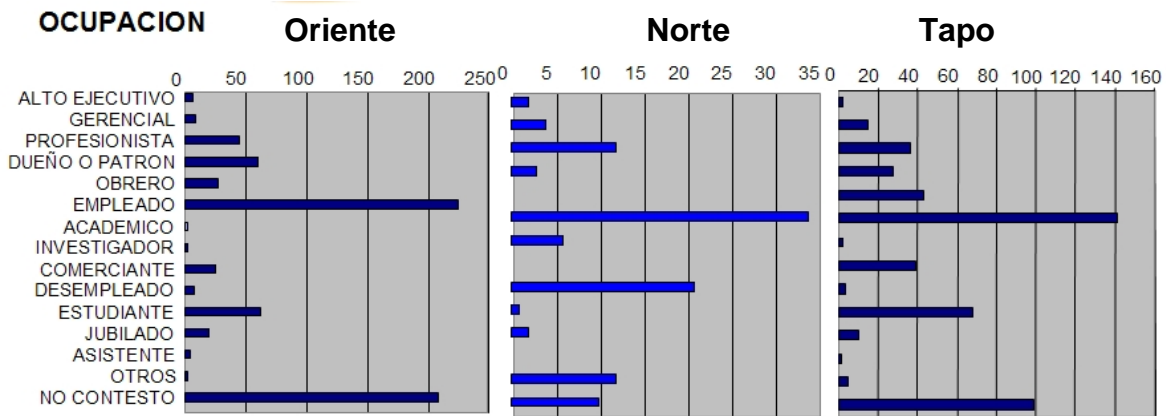
El objetivo primordial de esta encuesta era obtener la frecuencia de viajes de los viajeros potenciales y poder comparar las variaciones con en nivel socioeconómico e ingreso. El universo de la encuesta fueron las personas que viajan en autobús, obteniéndose un total de 1756 cuestionarios (44% en la central de oriente, 12% en la central del norte y 44% en la central poniente).

Se muestran las gráficas de manera simultánea para comparar los distintos mercados hacia los diferentes puntos de la ciudad de México.

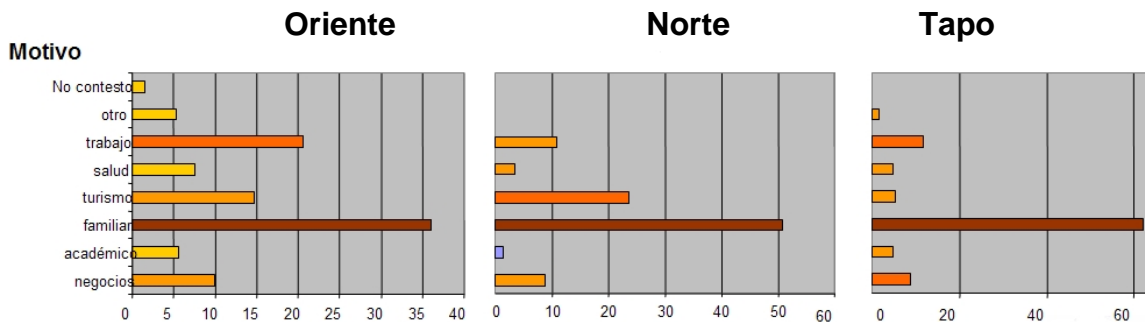


Gráfica 4.3 Frecuencia de los diferentes grupos de edades de los encuestados en las diferentes terminales de autobuses. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

En la comparación de la gráfica 4.3, resalta a primera vista la semejanza entre las poblaciones que visitan las tres terminales por ejemplo, en todas el rango de 18 a 25 años coincide con 26%. Respecto a la ocupación (gráfica 4.4) destaca “empleado” en las mismas proporciones, pero también existe una presencia de otros rubros como “patrón” y “profesionistas”. Respecto al motivo del viaje, en primer lugar “familia”, seguido de “trabajo” y “negocio”. Puede resumirse que *las tres terminales tienen una composición de viajeros muy similar, tanto en edad como en profesión.*



Gráfica 4.4 Arriba: Ocupación y frecuencia de viaje de los encuestados en las diferentes terminales de autobuses. Abajo: Motivo de viaje de los encuestados. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.



Características socioeconómicas del área de estudio.

Tomando en cuenta la incidencia que las condiciones socioeconómicas imperantes dentro del área de estudio tienen sobre los patrones de movilización, tanto de personas como de mercancías, es necesario discutir aspectos relacionados con la población, distribución de actividades y parque automotor propios del área de estudio.

Estructura por edades

Las áreas de servicio de los aeropuertos considerados registran en general una gran cantidad de población en edades de viajar.

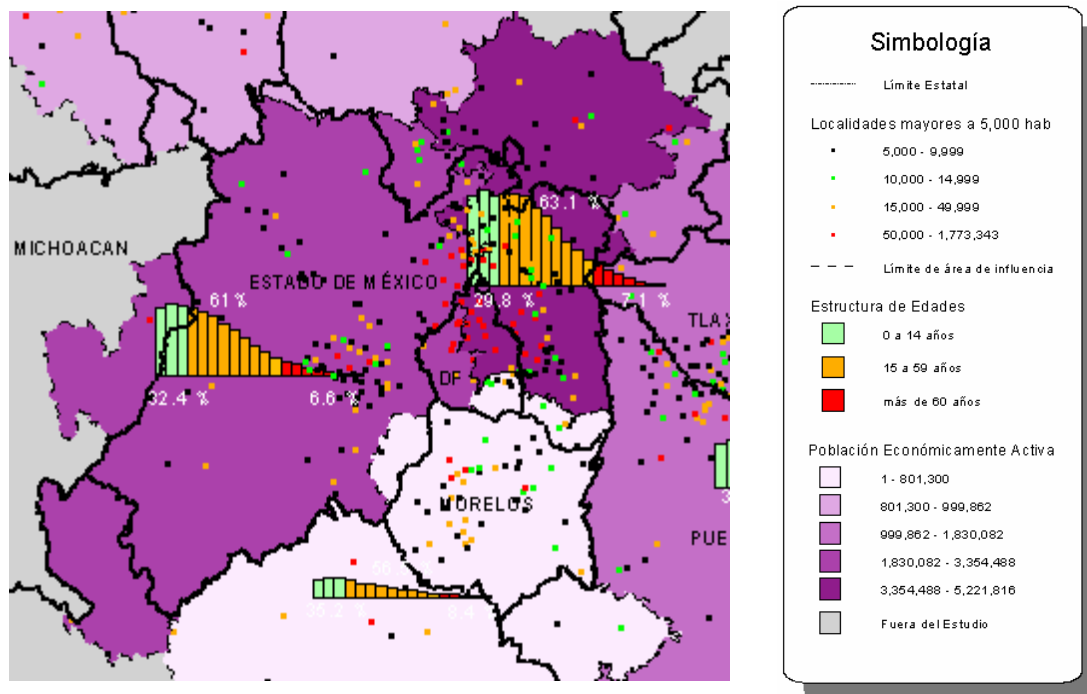


Figura 4.17 Estructura por edades de cada área de influencia de los aeropuertos en estudio. Fuente: Instituto de Geografía (IGg, UNAM).

ESTRUCTURA POR GRUPOS DE EDADES			
ÁREA DE SERVICIO	NIÑOS	JOVENES ADULTOS	MÁS DE 65 AÑOS
AICM	29.8	63.1	7.1
TOLUCA	32.4	61.0	6.6

Tabla 4.7. Resumen con los porcentajes de cada grupo de edad. Fuente: IGg, UNAM.

Ingresos

Como se aprecia sólo un porcentaje muy bajo recibe ingresos superiores a los 5 y 10 salarios mínimos.

INGRESOS DE LA POBLACIÓN OCUPADA					
ÁREA DE SERVICIO	HASTA 2 S.M.	2-5 S.M.	5-10 S.M.	MÁS DE 10 S.M.	MÁS DE 5 S.M.
AICM	52.11	34.14	9.6	4.15	13.75
TOLUCA	54.35	31.19	8.88	5.58	14.46

Tabla 4.8. Resumen con los porcentajes según grupo de ingresos. Fuente: IGg, UNAM.

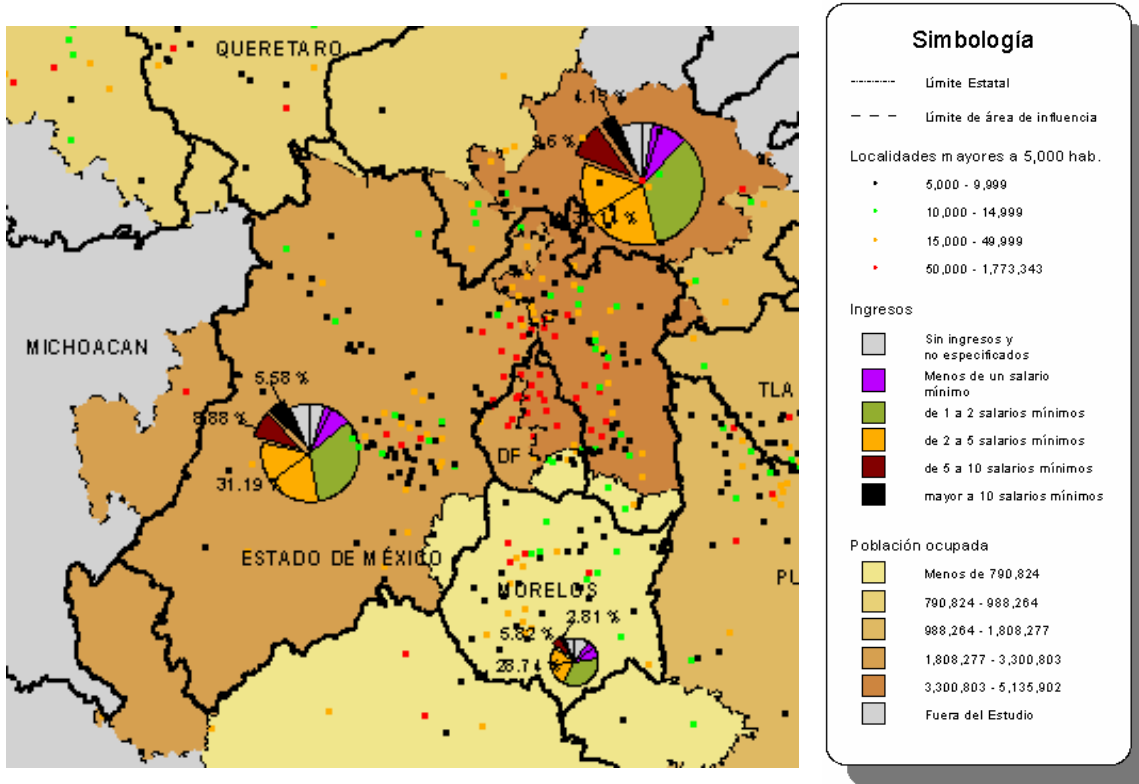


Figura 4.18 Mapa con la estructura del ingreso de los habitantes de cada área de influencia de los aeropuertos en estudio. Fuente: IGg, UNAM.

Educación

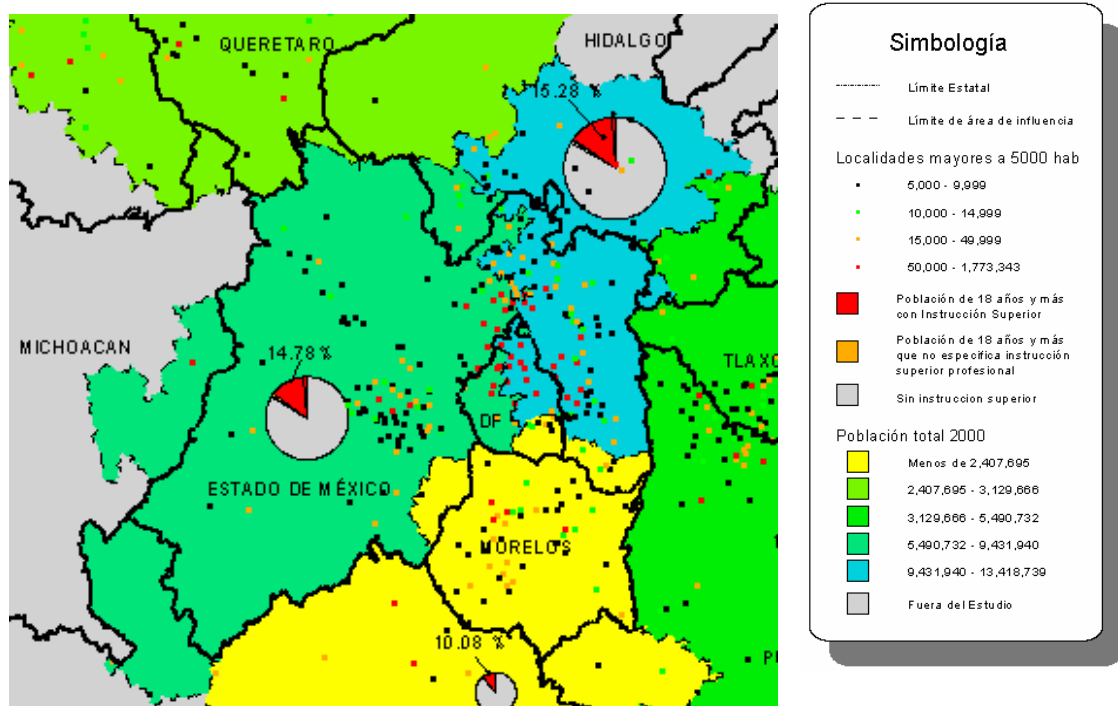


Figura 4.19: Nivel de estudios de los habitantes de cada área de influencia de los aeropuertos en estudio. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

POBLACIÓN CON INSTRUCCIÓN SUPERIOR PROFESIONAL	
ÁREA DE SERVICIO	%
AICM	15.28
TOLUCA	14.78

Tabla 4.9 Porcentaje de la población total que cumple con instrucción superior profesional. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

Como se muestra en la figura 4.19, incluso en términos del nivel de educación, variable que esta directamente relacionado con el perfil de usuarios de servicios aéreos (un % muy alto de viajeros tiene licenciatura o posgrado) se advierte que es un número muy reducido de habitantes el que cuenta con este nivel de educación.

Localización de los usuarios según su perfil

En función del perfil de usuario del aeropuerto y de las características de la población que se encuentra en el área de influencia, el grupo de trabajo que se encargó de determinar la demanda obtuvo una fórmula factorial⁸ que se aplicó a cada una de las microregiones. Así, por los datos socioeconómicos que posee cada AGEB se obtuvo el nivel de perfil de cada una de ellas. Finalmente se mapeo este indicador con los lugares donde vive mayor proporción de gente con el perfil de viajero.

Con base en la aplicación de la regresión canónica en la fórmula factorial, se obtuvo la información de la demanda potencial por AGEB urbana. En la tabla siguiente (4.10) se reveló que el área de influencia del aeropuerto de Toluca concentra al 32% de los viajeros y el 33% de los viajes estimados para todos los aeropuertos de la región en estudio.

Aeropuerto	Viajeros	%	Viajes	%
AICM	5,000,000	51%	5,500,000	48 %
Toluca	3,500,000	32%	4,000,000	33%

Tabla 4.10 Concentración de viajes y viajeros producto del análisis de regresión canónica. Destaca el aeropuerto de Toluca en segundo lugar. Fuente: IGg, UNAM.

Como puede observarse, en el siguiente mapa (figura 4.20), según la representación regional de los valores de la tabla anterior (4.10) utilizando barras, la mayor concentración de viajeros y viajes se encuentra dentro del área de influencia del AICM (51% y 48% del total estimado respectivamente) y en segundo lugar la estimación correspondiente al aeropuerto de Toluca (32% y 33% aprox.). Respecto a la distribución territorial de la frecuencia de viaje, puede apreciarse un sistema central que comprende la parte poniente del Distrito Federal y sus límites con el Estado de México. Otro sistema central con alta frecuencia de viaje, pero de menor extensión, se localiza en la región metropolitana de la ciudad de Toluca.

⁸ Mediante el método de regresión canónica. Este instrumento sirvió para conocer el tamaño del mercado de viajeros. Se construyó a partir de una base de datos de usuarios y no usuarios. El modelo arroja una fórmula que predice si una persona con determinadas características será o no usuaria. La fórmula se aplica a toda la muestra de personas censadas en el cuestionario ampliado, posteriormente se cuenta por AGEB cuantas personas cumplen con las características.

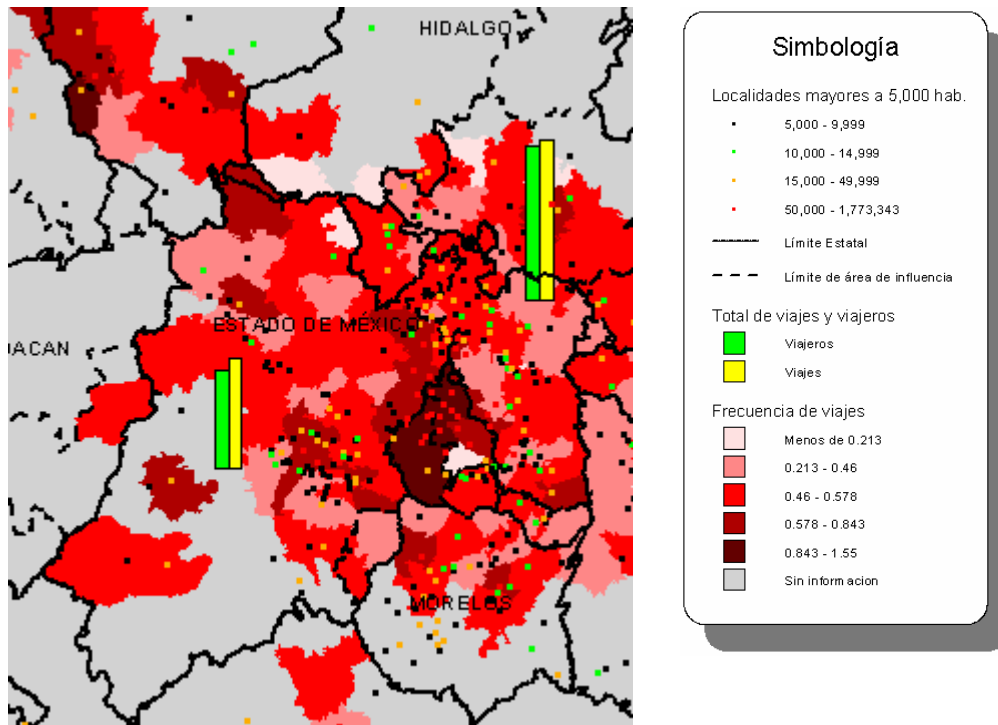


Figura 4.20 Viajes, viajeros y frecuencia de viaje. Fuente: Instituto de Geografía, UNAM.

A partir de esta información se procedió a generar el análisis de interacción gravitacional con el fin de diseñar las rutas y ramales principales que proporcionarían el servicio al Aeropuerto de la zona de influencia del aeropuerto de Toluca. *El supuesto básico de este análisis es que todos los viajes se realizan con origen en el hogar de los usuarios.*

4.4 Propuesta metodológica para la descentralización de pasajeros hacia el Aeropuerto Internacional de Toluca.

Planteamiento de la interacción

Para entender el tipo de interacción que se modeló en este estudio de caso, se considera pertinente hacer los siguientes planteamientos:

- Al determinar el área de influencia de un aeropuerto, se considera que se trata de un *sistema cerrado*, es decir, no existen (o no deben existir) usuarios que prefieran utilizar otro aeropuerto para realizar su viaje, ni usuarios de otros aeropuertos que prefieran utilizar este.
- El aeropuerto es el *único* centro *atractor de viajes* en el sistema. Los *generadores* de viajes son las unidades territoriales que concentran usuarios que cubren un perfil determinado con anterioridad.

$$T_{ij} = \frac{K_{ij} \frac{V_i^\lambda W_j^\alpha}{S_{ij}}}{\sum_{i,j=1}^n K_{ij} \frac{V_i^\lambda W_j^\alpha}{S_{ij}}}$$

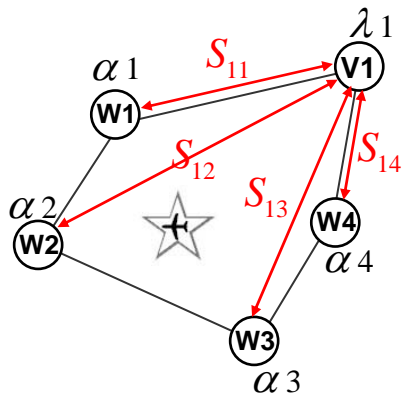


Figura 4.22 Representación de las variables para calcular la interacción gravitacional de la localidad V1 del problema expuesto.

Fuente: Elaboración propia.

Las variables utilizadas para la modelación de la interacción de cada localidad son:

- T_{ij} Probabilidad de interacción de los usuarios que viven en la localidad i con los usuarios de las demás localidades ($j=1 \dots jn$) dentro del área de influencia del aeropuerto de Toluca.
- V_i Número de viajes que los usuarios de la localidad i realizarían hacia el aeropuerto de Toluca utilizando la unidad temporal de análisis.
- W_j Número de viajes que los usuarios de la localidad j realizarían hacia el aeropuerto de Toluca utilizando la unidad temporal de análisis.
- λ Frecuencia de viaje de los usuarios que viven en la localidad i .
- α Frecuencia de viaje de los usuarios que viven en la localidad j .
- S_{ij} Función de impedancia entre los viajeros de la localidad i y los de la localidad j . Para este análisis se calculó el tiempo de recorrido de la ruta óptima sobre la red carretera.

Se consideró que la constante de calibración K de ajuste específico de zona a zona es igual a 1, ya que los efectos socioeconómicos relevantes estuvieron contemplados durante la fase de obtención de la cantidad de usuarios posibles (ingreso, educación y edad), además no se contó con información sobre el uso futuro del suelo.

Respecto a la selección de masas, la información proporcionada -producto del estudio geostadístico, se entregó en dos formatos: viajes y viajeros, ambas con unidad temporal de un año. Antes de aplicar el modelo gravitacional fue importante definir cual de las dos variables se utilizarían como masas, pues los resultados varían según cada caso.

Se entiende por *viajeros* al número de personas que cubren un perfil y que son usuarios actuales o potenciales del aeropuerto. El *número de viajes* es el número de operaciones totales que recibiría el aeropuerto en la unidad temporal de análisis como resultado de la frecuencia de viaje de los viajeros. En la siguiente figura (4.23) se muestra para la unidad territorial X1 una representación de las variables de masa presentes en el estudio. Se infiere

que la interacción entre el centroide y el aeropuerto se produce por los viajes/año realizados, no por el número de viajeros.

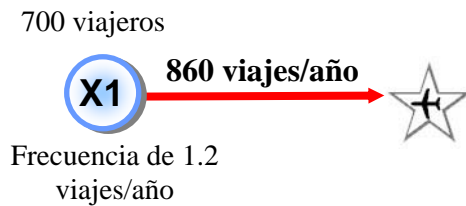
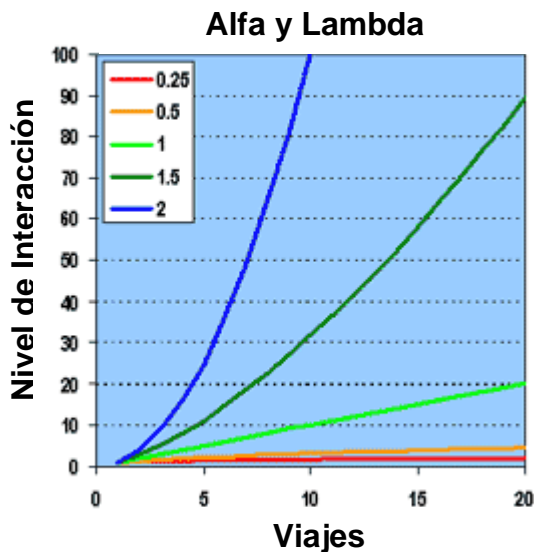


Figura 4.23 Variables de masa: viajes, viajeros y frecuencia de viaje.

Fuente: elaboración propia.

La forma en que se ponderó cada masa fue utilizando la frecuencia de viaje como exponentes alfa y lambda. Se observa que para valores de 1, hay una relación lineal entre los viajes y el nivel de interacciones. Cualquier valor más grande que 1 implica un crecimiento exponencial del nivel de interacción conforme los viajes crecen.



Esta gráfica se puede interpretar de la manera siguiente: A mayor frecuencia de viaje, existen mayores niveles de interacción entre las localidades que cubren el perfil de los usuarios del aeropuerto.

Gráfica 4.5 Relación de los exponentes Alfa y Lambda con el número de viajes y el nivel de interacción. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la función de impedancia para cuantificar la separación espacial, el tiempo de viaje intrazonal no se consideró en éste análisis debido a falta de información proveniente de las encuestas y la inexistencia de redes viales urbanas con suficiente detalle.

Las variables *total de viajes*, *viajeros* y *frecuencia de viaje* obtenidas en el análisis geoestadístico fueron agregadas a dos niveles: para la escala metropolitana como unidades territoriales AGEB (Áreas Geoestadísticas Básicas) del INEGI y a escala regional como municipios. A continuación se presenta un mapa a escala regional del área de influencia del Aeropuerto de Toluca representando las tres variables. (Figura 4.24).

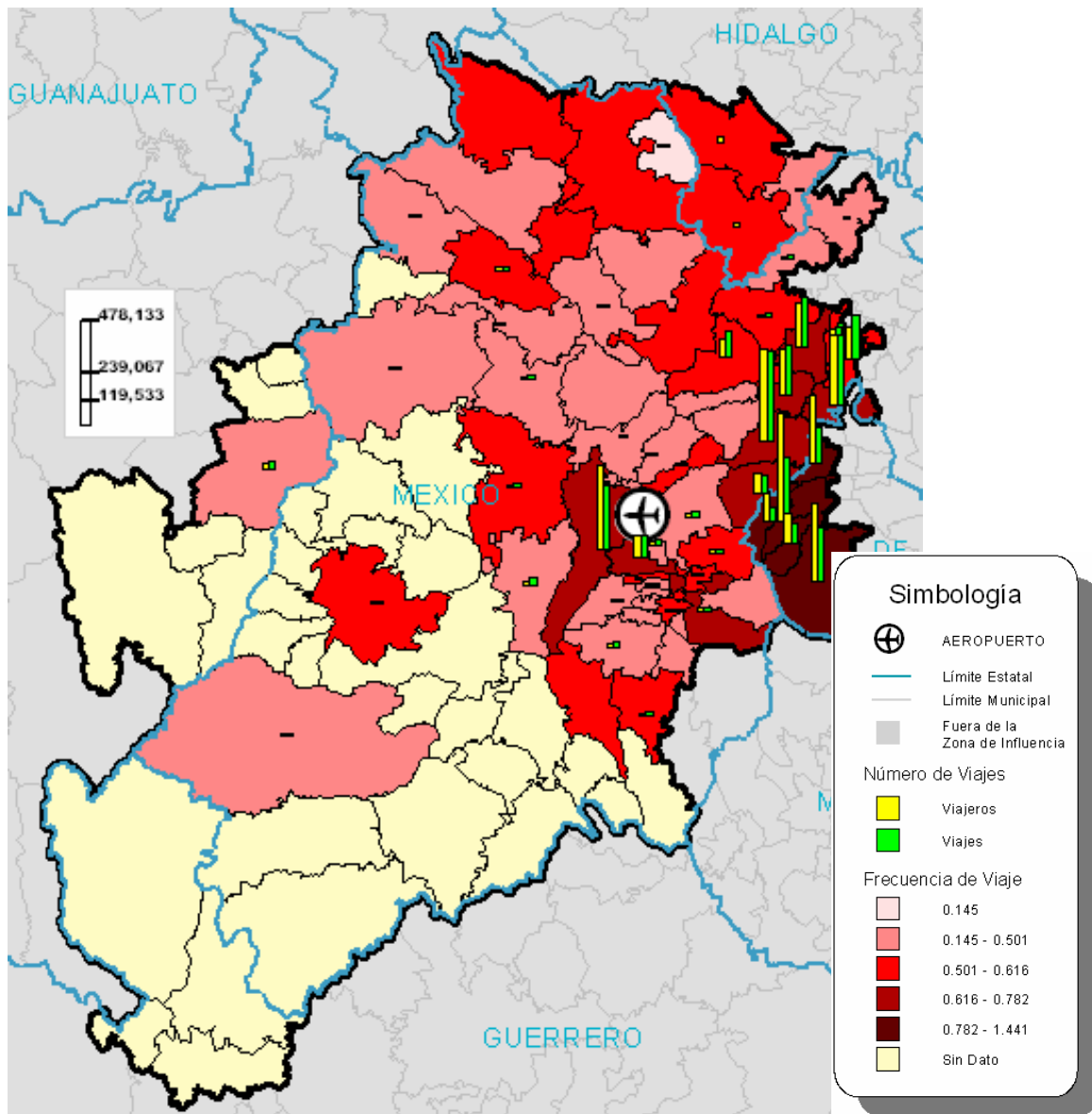
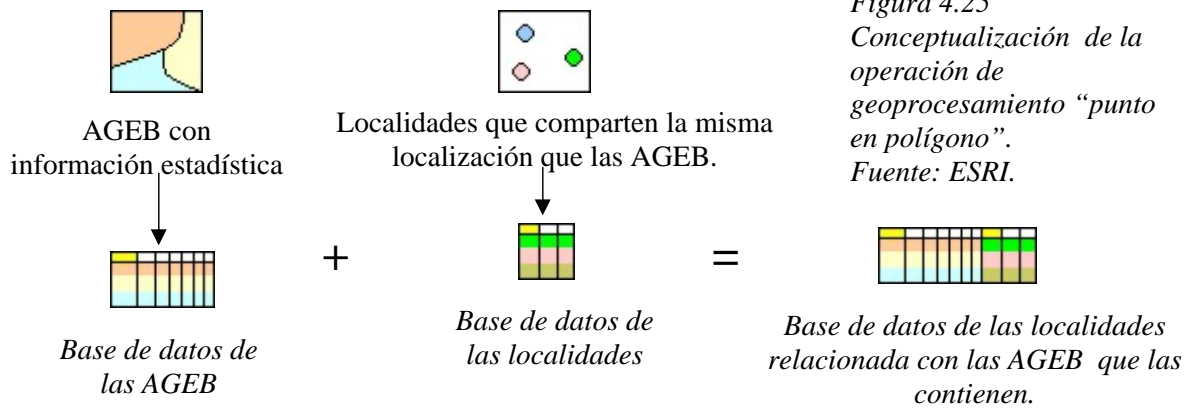


Figura 4.24 Frecuencia de viaje y número de viajeros y viajes dentro de la zona de influencia del aeropuerto de Toluca. Fuente: IGg, UNAM.

Modelación de las interacciones con la teoría de grafos en el SIG

Como se mostró en la figura 4.22, para realizar la modelación se empearon grafos, por lo que fue necesario utilizar la información de la demanda en nodos concentradores de las variables V , W , λ y α . Este procedimiento, en primer lugar consiste en transferir la información contenida en un tema poligonal (AGEB) a otro tema puntual (localidades) que comparten la misma localización. En la siguiente figura (4.25) se representa esta operación de geoprocésamiento llamada también unión espacial (en inglés *spatial join*). Con esta operación de geoprocésamiento es posible saber a que AGEB le corresponde cada localidad por estar contenida.



A escala metropolitana, la información estadística de los usuarios probables del aeropuerto de Toluca se entregó agregada en 2,301 Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) del INEGI. A esta escala, 248 localidades eran candidatas a ser nodos usando como criterio el estar contenidas en alguna AGEBS (vea la siguiente figura, 4.26).

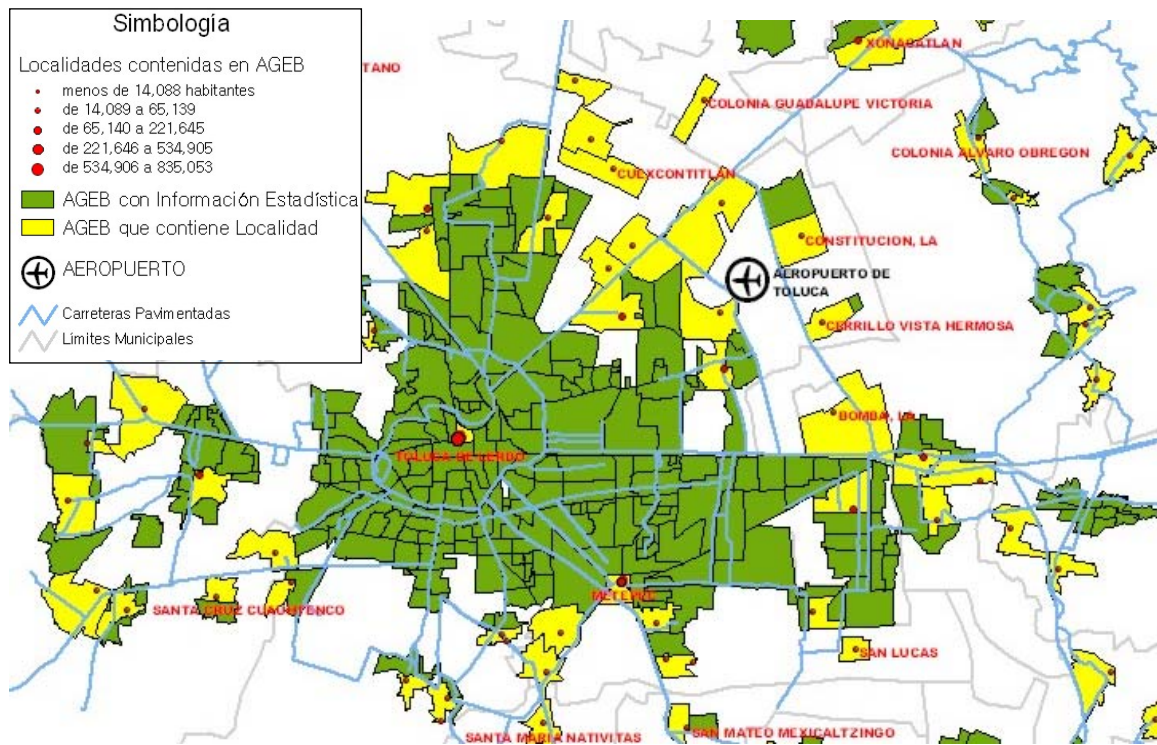


Figura 4.26 Escala metropolitana: AGEBS que conforman la zona urbana de Toluca. En amarillo se muestran aquellas que contienen una localidad que puede utilizarse como nodo para la modelación. A las AGEBS en verde se les tuvo que asignar un nodo.
Fuente: El autor.

Para el caso de los lugares donde INEGI no ha delimitado AGEBS no hubo más remedio que utilizar la escala regional. Con este fin se utilizó la información pronosticada (número de viajes, viajeros y frecuencia) agregada en municipios.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

El criterio con el que se definieron los nodos fue considerar la localidad con mayor número de habitantes por tener cercanía a la red. En la figura de la derecha (4.27) se muestran los municipios utilizados: Valle de Bravo, Zitácuaro y Tejupilco, con localidades (azul) asignadas del mismo nombre.

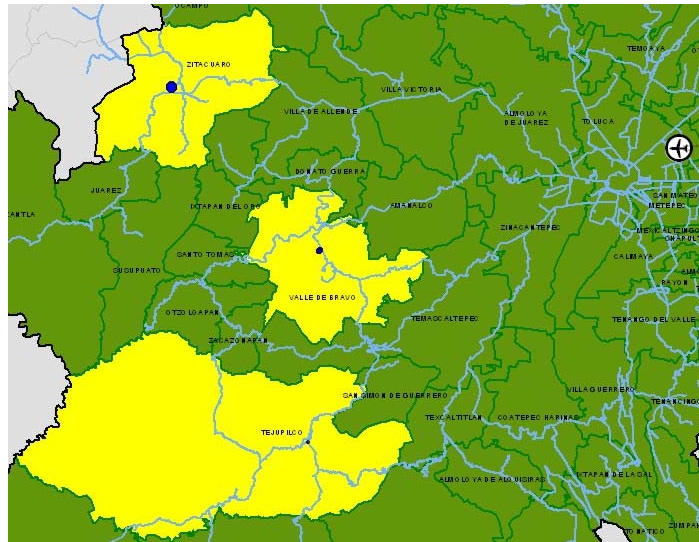
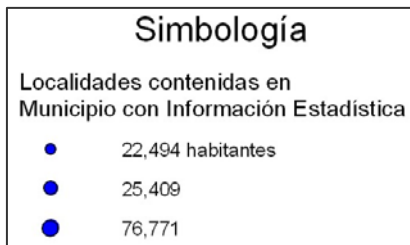


Fig. 4.27 Nodos obtenidos a partir de las localidades con mayor no. de habitantes en los municipios sin AGEB. Fuente: el autor.

La siguiente figura (4.28) muestra las localidades que pertenecen a las AGEB (rojo) para el análisis a escala metropolitana y a los municipios sin AGEB (azul), ambas unidades territoriales con información de viajes, viajeros y frecuencias con perfil de usuario del aeropuerto de Toluca.

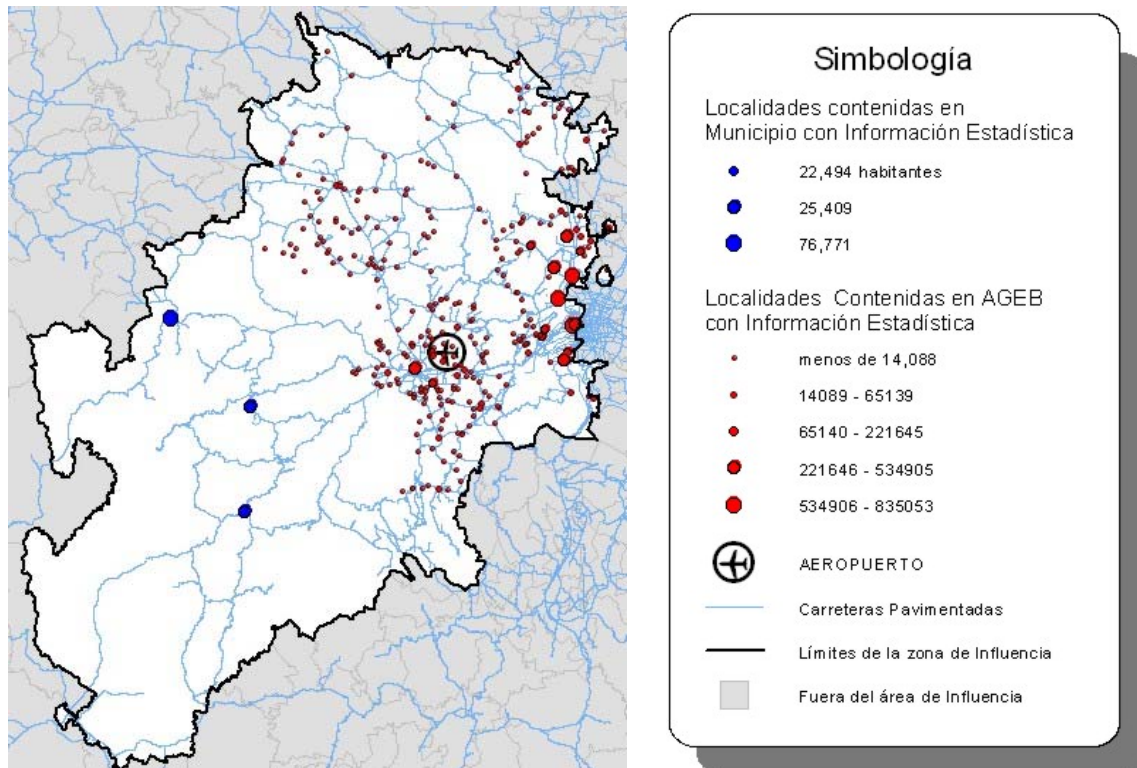
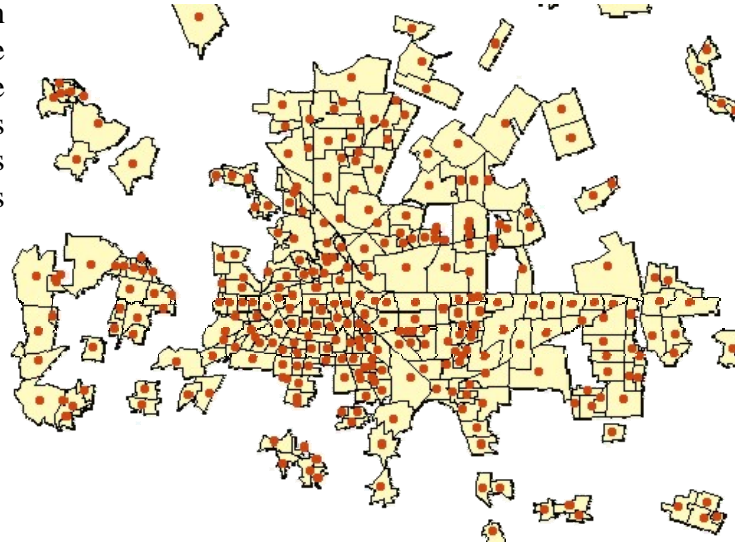


Figura 4.28 Localidades puntuales dentro de la zona en estudio que se pueden utilizar como nodos para modelar. Fuente: IGg, UNAM.

Tuvo que hacerse otra depuración a estos candidatos a ser nodos considerando únicamente las localidades urbanas según el INEGI (más de 2,500 habitantes), quedando un total de 218 localidades incluidas en una AGEB. El total de localidades a las dos escalas es de 218 (para las AGEB) y 3 para los municipios, dando un total de 221 centroides.

Para agrupar las AGEB según las áreas de los polígonos de Thiessen de las localidades fue necesario generar centroides geométricos (figura 4.29). Esto es posible mediante diversos algoritmos incluidos en el SIG.

Figura 4.29 Centroides geométricos de las AGEB de la zona metropolitana de Toluca. Esta función está incorporada en los SIG comerciales. Fuente: Elaboración propia.



Mediante una operación de unión espacial entre la cobertura de centroides de AGEB y los polígonos de Thiessen, se logró definir a que polígono pertenece cada conjunto de AGEB (figura 4.30).

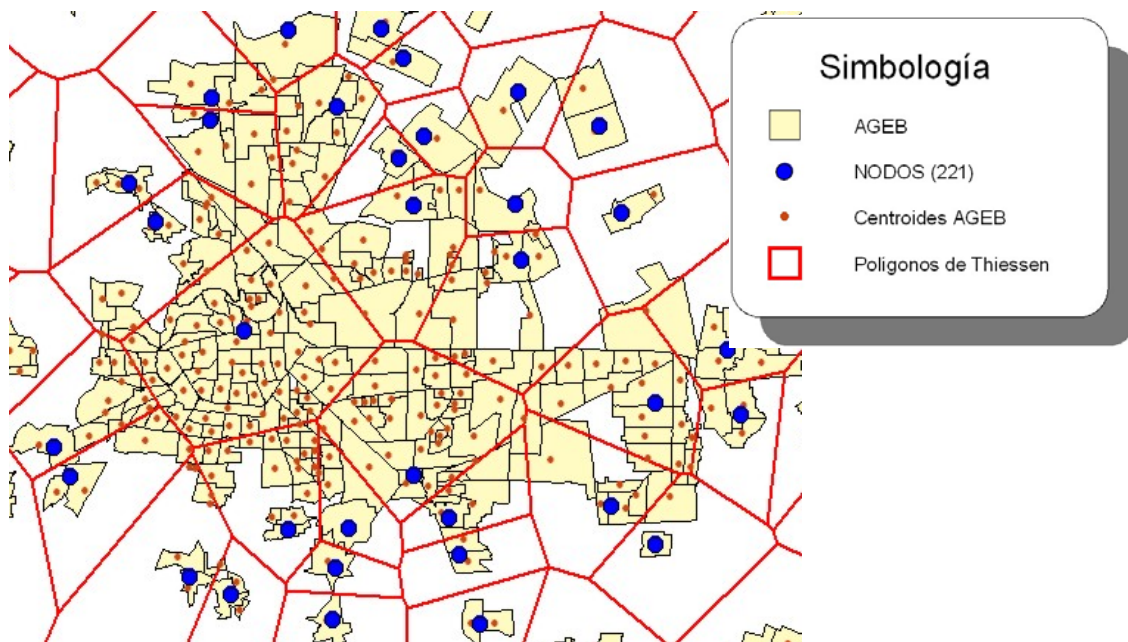


Figura 4.30 Centroides de AGEB y polígonos de Thiessen antes de hacer la unión espacial. En azul se representan las localidades consideradas como nodos. Fuente: Elaboración propia.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

En la figura siguiente (4.31), se muestra un ejemplo de la zona metropolitana de Toluca donde se hizo la simplificación de las AGEB en nodos que representan localidades.

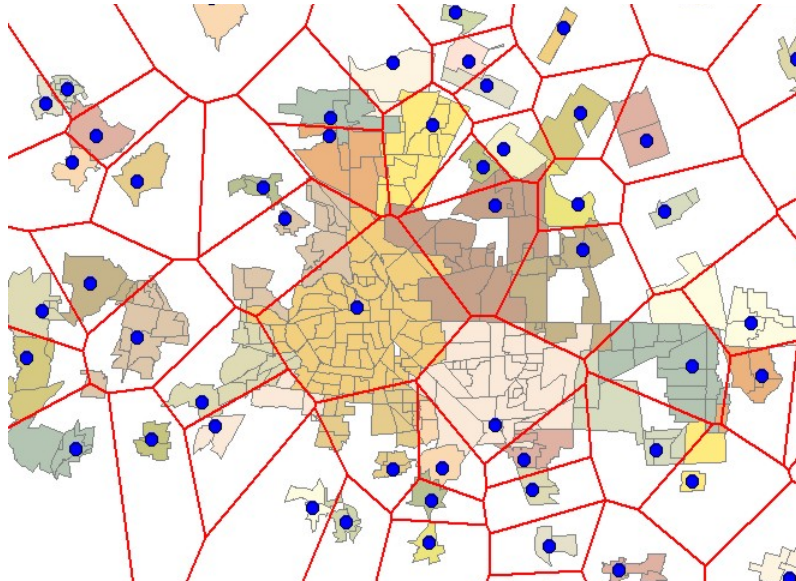


Figura 4.31 AGEB asignadas según el polígono de Thiessen en el que se encuentra su centroide geométrico. A partir de esta zonificación fue posible obtener la masa de cada nodo sumando las variables de cada unidad. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.32 se muestra el total de 221 centroides utilizados para obtener el índice gravitacional de interacción.

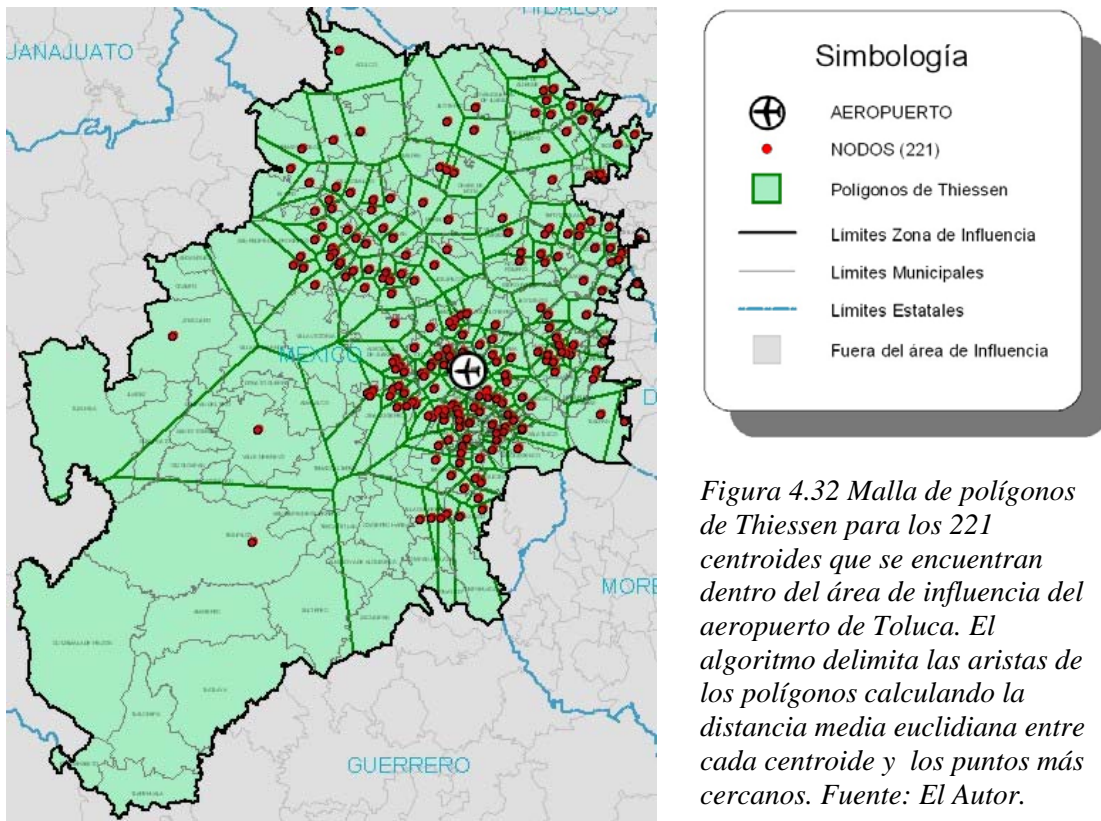


Figura 4.32 Malla de polígonos de Thiessen para los 221 centroides que se encuentran dentro del área de influencia del aeropuerto de Toluca. El algoritmo delimita las aristas de los polígonos calculando la distancia media euclidiana entre cada centroide y los puntos más cercanos. Fuente: El Autor.

Posteriormente se obtuvieron totales por polígono de Thiessen de los *viajes estimados*, con el fin de obtener la masa total de cada nodo. A continuación en la figura 4.33 se presentan los resultados de estas sumas. Cabe recordar que se trata del número de viajes anuales estimados por el modelo de regresión canónica.

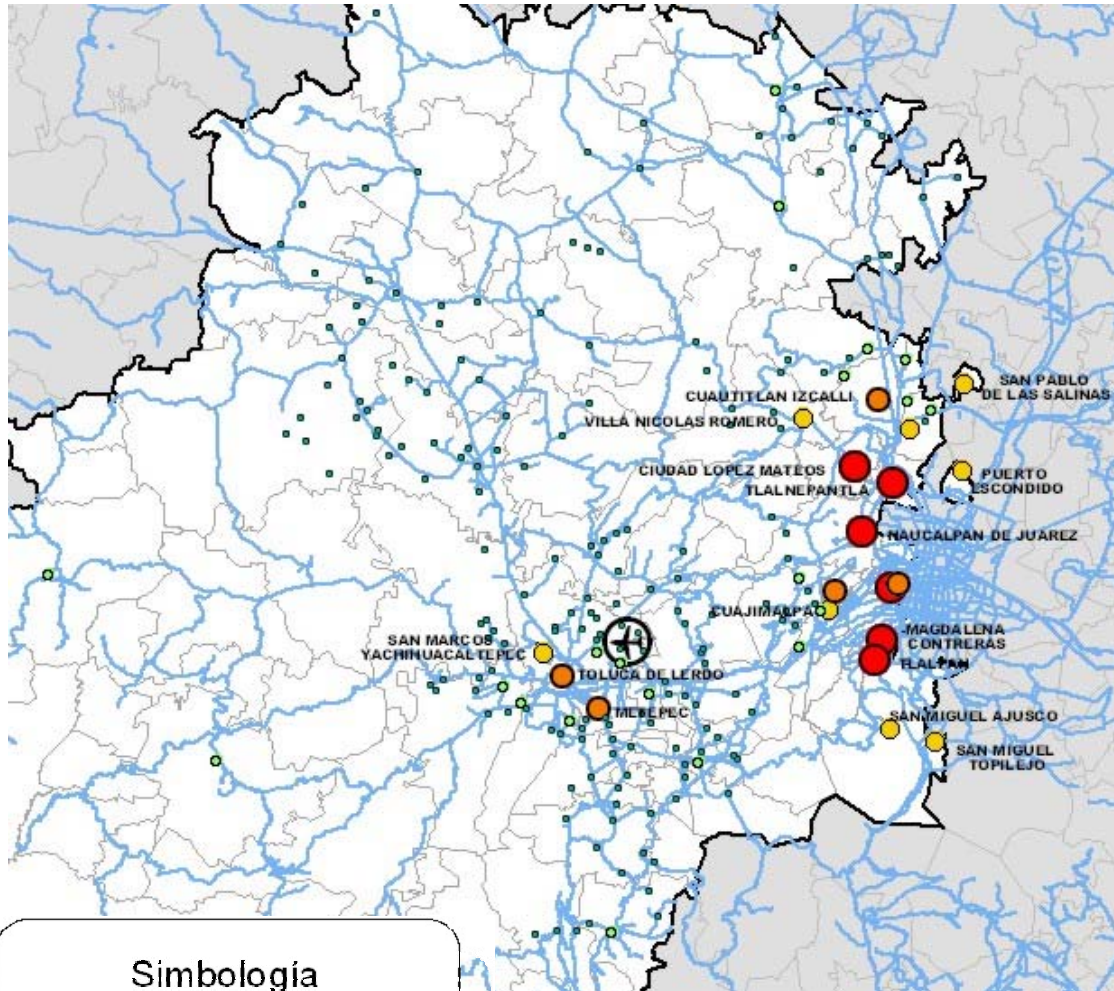


Figura 4.33 El tamaño de los nodos representa el número de viajes totales. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las frecuencias de viaje, puesto que cada AGEB tiene valores diversos se procedió a realizar la modelación utilizando las *frecuencias de viaje mínimas* contenidas en cada polígono de Thiessen para la modelación, ya que el uso del promedio no es adecuado pues en los casos en que existen frecuencias muy altas, se produce amplio sesgo al utilizar este valor en el modelo.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Este criterio fue utilizado con el fin de 1) homogeneizar los valores pues de otra forma no hubiese sido posible sintetizar las frecuencias en centroides y 2) demostrar el efecto que tienen estos factores sobre las interacciones. En la figura siguiente (4.34) se muestran las tres variables de frecuencia de viaje (mínima en rojo, máxima en verde y promedio en azul) contenidas en cada centroide:

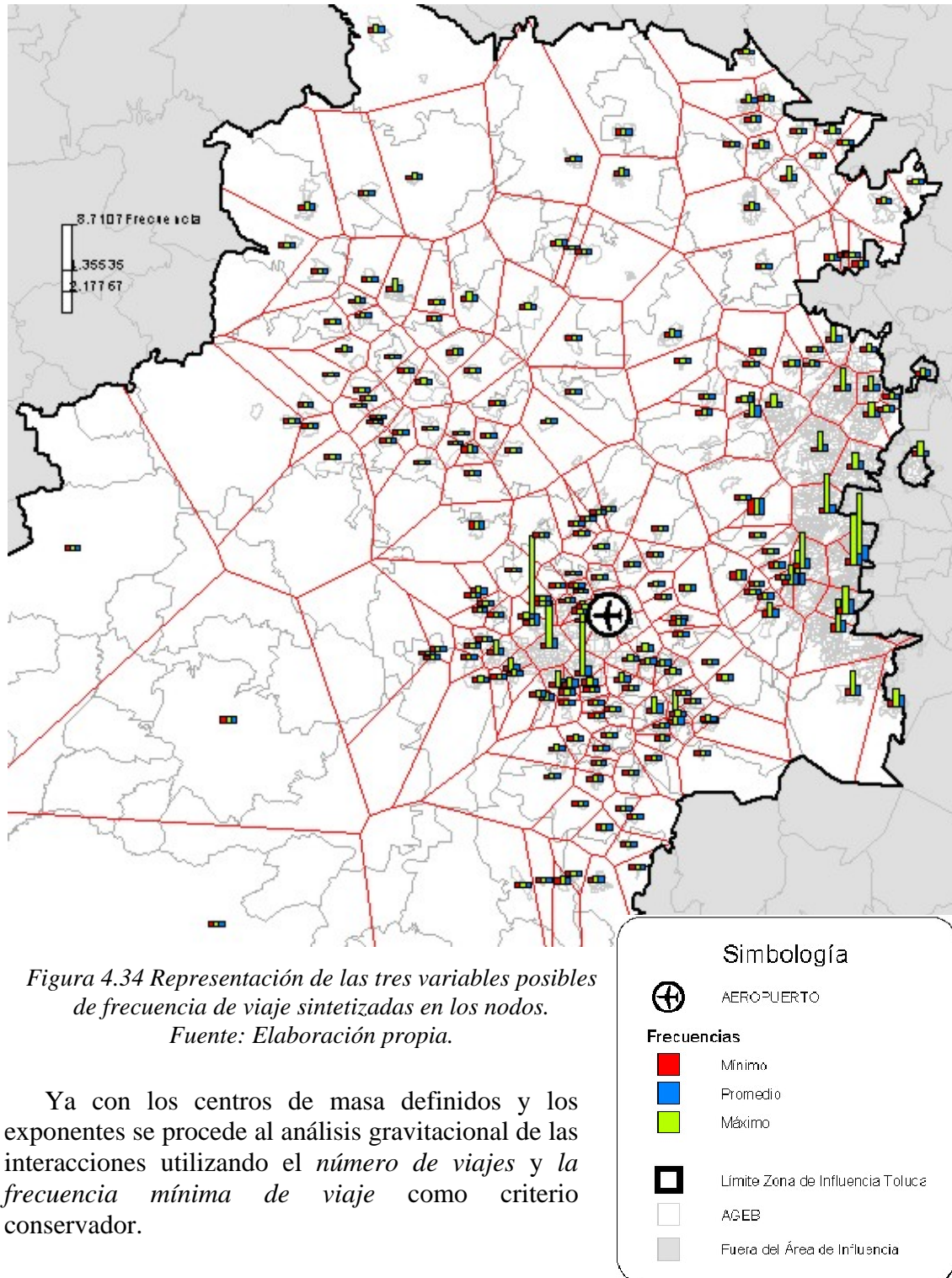


Figura 4.34 Representación de las tres variables posibles de frecuencia de viaje sintetizadas en los nodos.

Fuente: Elaboración propia.

Ya con los centros de masa definidos y los exponentes se procede al análisis gravitacional de las interacciones utilizando el *número de viajes* y la *frecuencia mínima de viaje* como criterio conservador.

El cálculo de las impedancias se hizo utilizando la red vial pavimentada proporcionada por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), actualizada al año 2004. Para esta base geométrica se revisó la conectividad de la red y se generó topología arco-nodo (figura 4.35) con ayuda del SIG ArcInfo -de ESRI, con la finalidad de generar las rutas óptimas lo más realista posible. Aunque la información oficial del IMT en términos generales tiene buena calidad pues fue levantada utilizando GPS, la red fue generada en principio como un inventario de infraestructura y no posee las características topológicas necesarias para realizar este tipo de análisis.

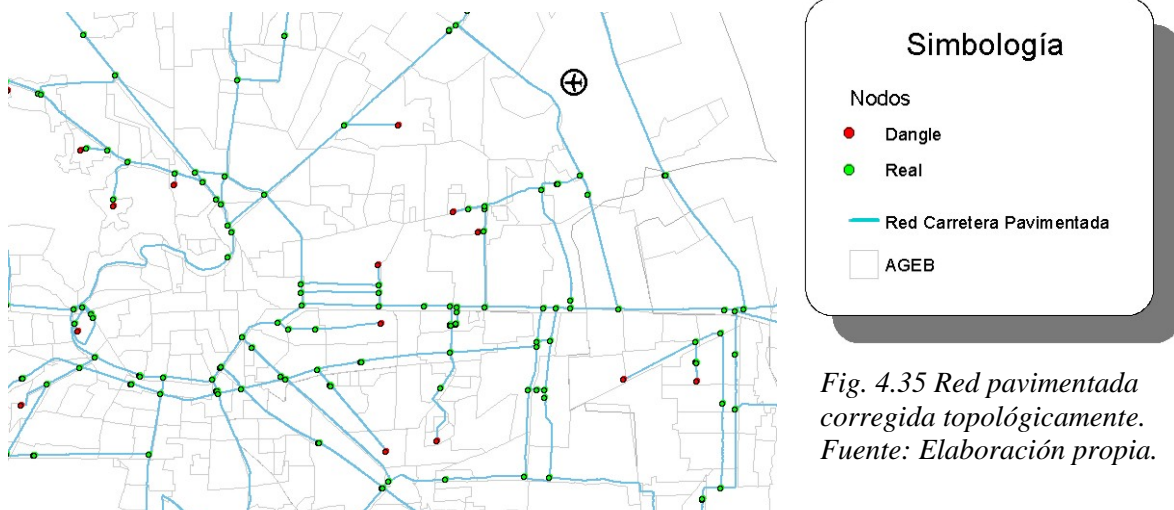


Fig. 4.35 Red pavimentada corregida topológicamente. Fuente: Elaboración propia.

Otra adecuación hecha a la información fue la georreferenciación de los nodos contenedores de las masas. Cabe recordar que son localidades de la base de datos del INEGI, y no conforman un grafo con la red como se muestra en la siguiente figura (4.36).

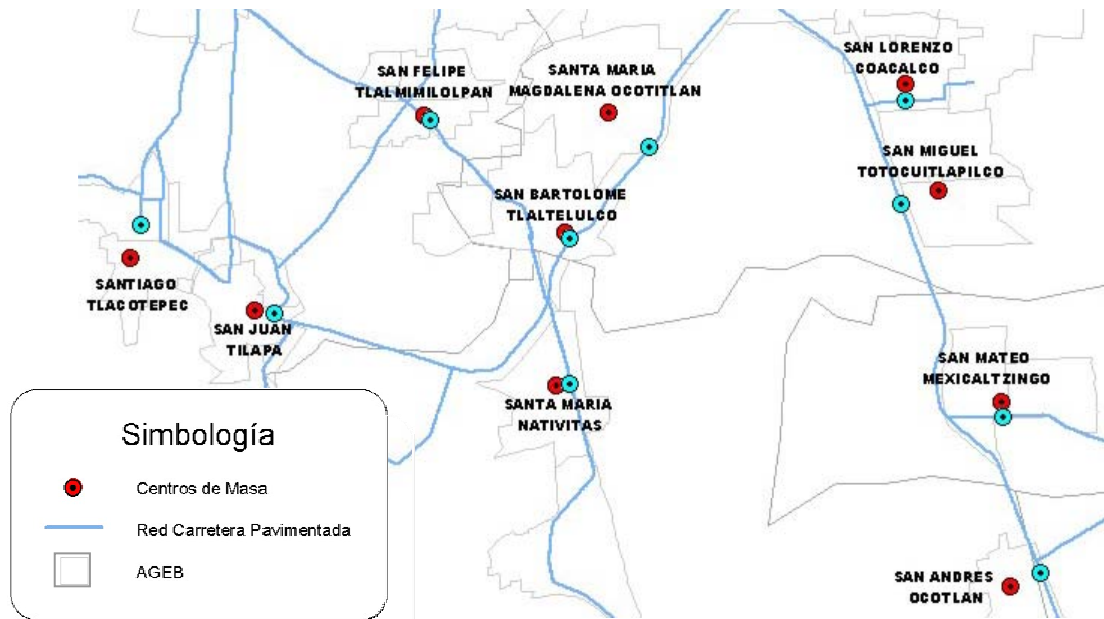


Figura 4.36 Se observa que los centros de masa seleccionados, con la referencia del INEGI (rojo) no conforman una estructura arco-nodo con la red pavimentada. Centros corregidos en azul. Fuente: Elaboración propia.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

El ajuste mostrado en la figura anterior (4.36) se llevó a cabo utilizando un algoritmo de proximidad en el SIG⁹, que reposiciona los centros de masa exactamente sobre los nodos de la red vial, completando así la *estructura arco-nodo* necesaria para la modelación.

Posteriormente se procedió a generar la matriz de impedancias con ayuda de la herramienta *Shortest Network Paths v.1.0* (para el programa ArcView), una mejora para la extensión *Network Analyst* de ESRI que permite realizar análisis de rutas óptimas “todos contra todos” utilizando el algoritmo de asignación “*todo o nada*”¹⁰.

Cada par origen-destino en la base geométrica de la matriz de impedancias es una polilínea que conecta ambos nodos por ruta óptima y tiene como atributos los identificadores de las localidades de origen y destino, así como un campo de costo con el tiempo en minutos que implica conectarlos. Se presenta una muestra de esta base de datos y su respectiva geometría (figura 4.37 y 4.38).

RUTA ÓPTIMA					
Shape	ID ORIGEN	NOMBRE ORIGEN	ID DESTINO	NOMBRE DESTINO	COSTO (min)
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	101	METEPEC	70.611

Figura 4.37 Muestra de un registro de un par origen-destino de la matriz de impedancias. Fuente: Elaboración propia.

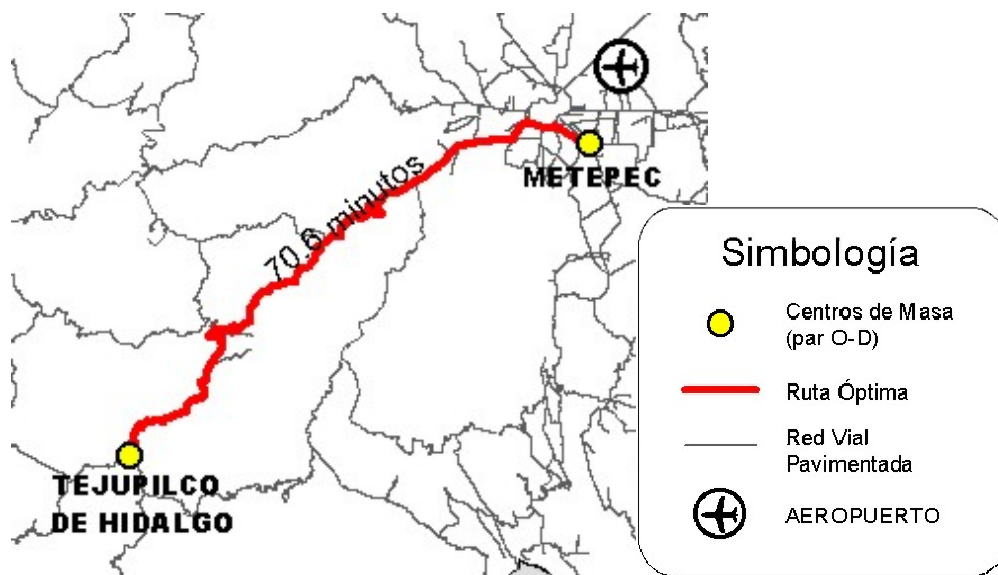


Figura 4.38 Ejemplo de una ruta óptima entre un par o-d de centros de masa. La matriz de impedancias está conformada por 48,841 pares. Fuente: El Autor.

En la siguiente figura (4.39) se muestra el total de rutas óptimas contenidas en la matriz de impedancias, obtenida a partir del análisis *todos contra todos*. El siguiente paso es vincular la información de los centros de masa (viajes y frecuencias) a cada par origen-destino y proceder con la modelación.

⁹ La herramienta utilizada fue la extensión para ArcView *Point and Polyline Tools v.1.2* con la herramienta *snap points to polylines*. Se puede descargar gratuitamente del sitio de ESRI (<http://esri.com>).

¹⁰ Vea el capítulo 3 para mayor referencia: “Construcción del árbol de caminos”.

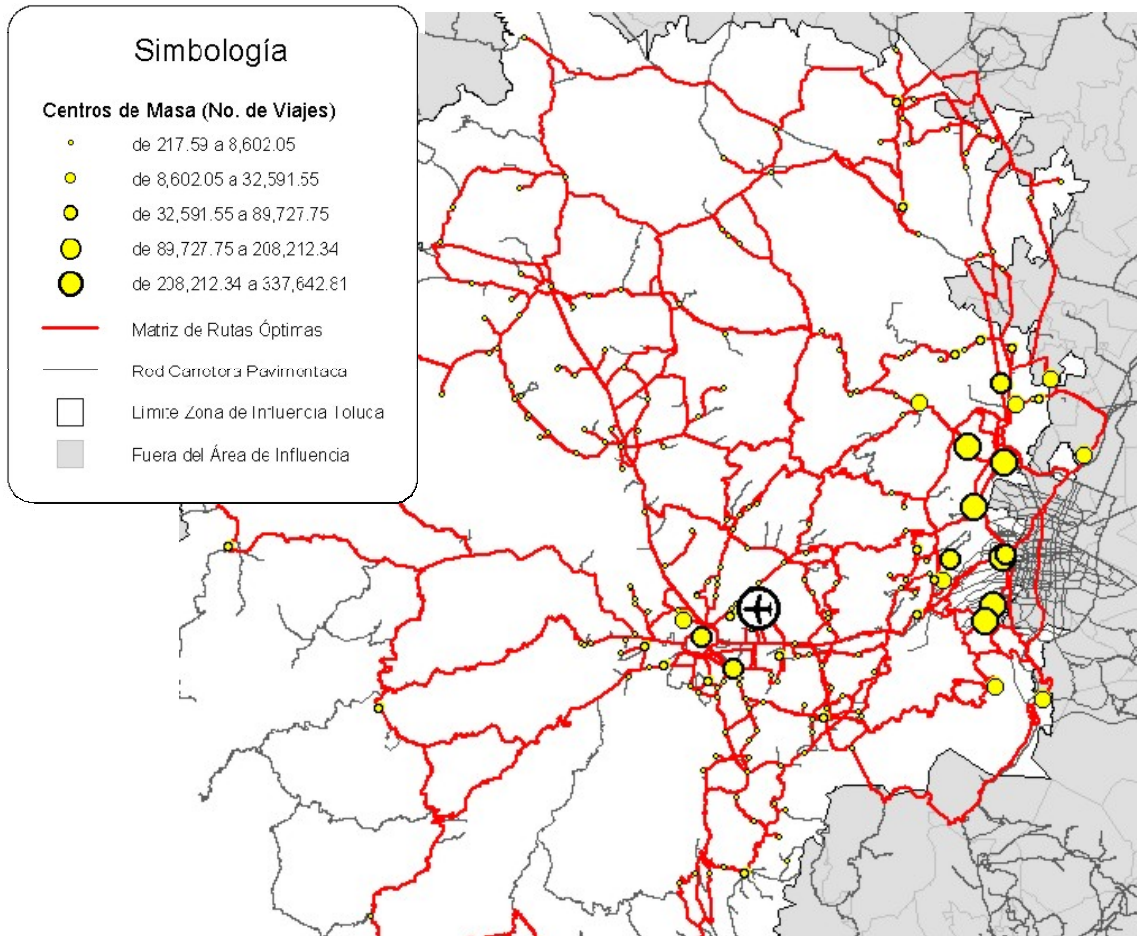


Figura 4.39 Resultado del cálculo de las impedancias (rojo) entre todos los pares origen-destino posibles de los centros de masa. Fuente: El Autor.

El proceso de cálculo de rutas óptimas requirió una computadora con características especiales de velocidad de procesamiento y memoria disponible puesto que se calcularon 221 centros de masa, que dan en total 48,841 (221×221) pares origen-destino.

Además se utilizaron 21,058 segmentos de la red vial contenidos en el interior y la periferia de la zona de influencia del aeropuerto de Toluca. Como resultado, la matriz de impedancias resultante tuvo un tamaño de 3.3 Gigabites (aproximadamente el espacio que proporcionan 5 discos compactos convencionales de 700 Megabites). El proceso tardó cerca de 2 horas en completarse utilizando una computadora con 3.19 Ghz. de velocidad de procesamiento y 2 GB de memoria RAM. Es importante comentar el aspecto técnico, pues en ocasiones el hecho de no contar con hardware adecuado imposibilita llevar a cabo los análisis.

Para integrar en una base de datos la información requerida por el modelo (los pares od, sus impedancias, viajes producidos y frecuencia) fue necesario hacer una concatenación entre la matriz de impedancias y la base de datos con viajes y frecuencias, utilizando un identificador común. A continuación en la figura 4.40 se muestra un esquema de este procedimiento.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

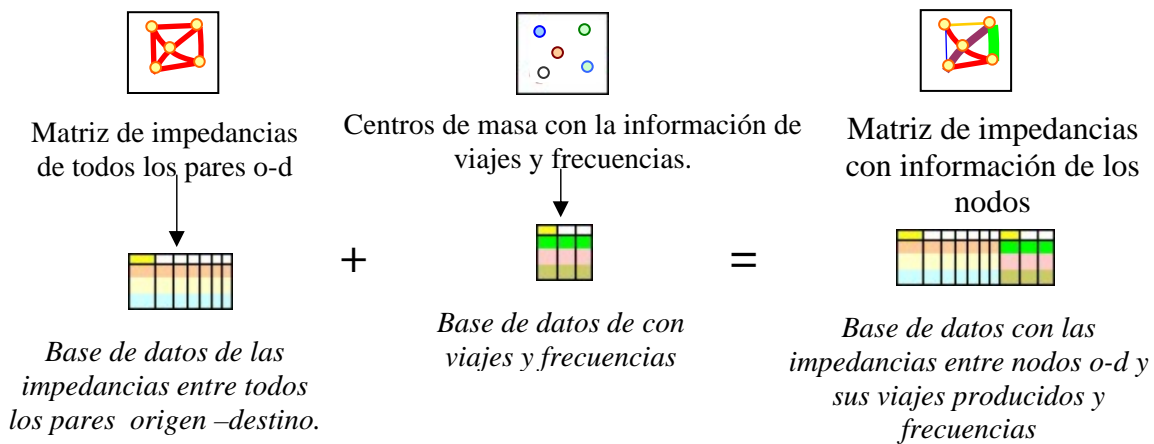


Figura 4.40 Operación de geoprocésamiento “unión espacial” para concatenar tablas.
Fuente: ESRI.

En la siguiente figura (4.41) se muestran los campos que contiene la cobertura de nodos (localidades consideradas para el análisis de la interacción). En esta base de datos se creó un campo (*CLAVE_U*) que funciona como identificador único para cada localidad con el fin de hacer posteriormente las concatenaciones con las otras bases de datos.

Cve_loc:
Clave de la localidad

Viajes:
Número de viajes que concentra ese nodo

CLAVE_U:
Clave única que sirve para identificar cada nodo (localidad)

Shape	Ent	Cve_loc	Nombre	Ageb	Viajes	Viajeros	FMIN	FMAX	FPPROM	CLAVE_U
Point	15	150820001	TEJUPILCO DE HIDALGO		7644.48	10415.00	0.466600000	0.466600000	0.4666	1
Point	15	151100001	VALLE DE BRAVO		11114.18	12810.00	0.591800000	0.591800000	0.5918	2
Point	16	161120001	HEROICA ZITACUARO		21797.01	32589.00	0.486800000	0.486800000	0.4868	3
Point	09	090040001	CUAJIMALPA DE MORELOS	002-A	89727.75	53821.00	0.515613190	3.372920968	1.1792	4

Ent:
Clave del estado al que pertenece la localidad

Nombre:
Nombre de la localidad

Ageb:
Clave de la AGEB a la que pertenece la localidad (según sea el caso)

FMIN, FMAX, FPPROM:
Variables de frecuencia: mínima, máxima y promedio.

Figura 4.41 Base de datos correspondiente a la cobertura de nodos.
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de rutas óptimas “todos contra todos” se genera a partir la cobertura de nodos y de la red vial, de la tabla anterior se utilizan como identificador para orígenes y destino el campo *CLAVE_U*. La matriz de impedancia resultante se muestra en la siguiente figura (4.42).

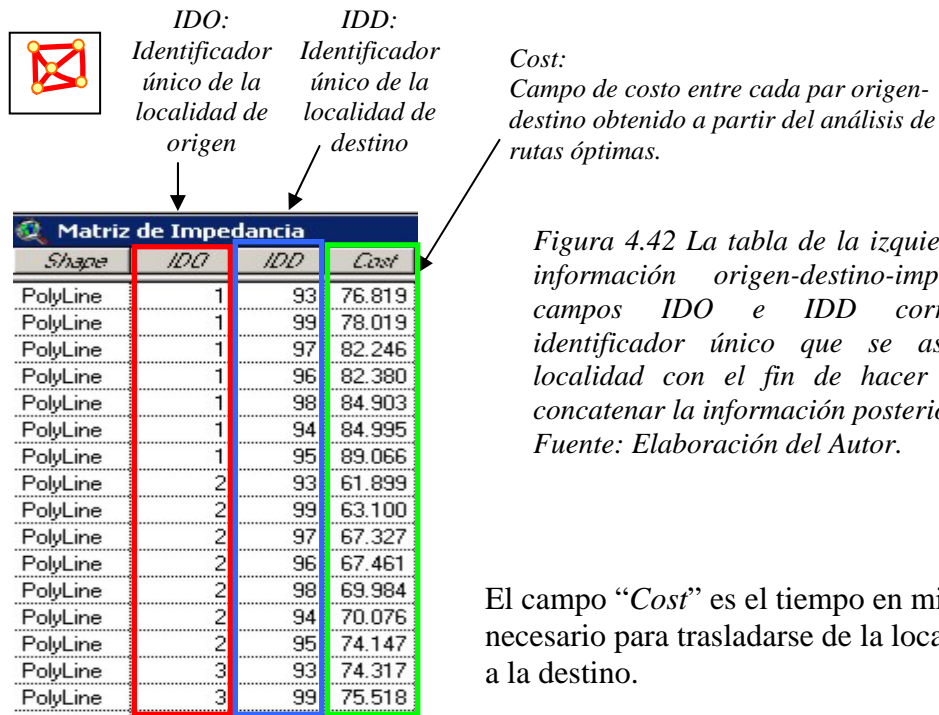


Figura 4.42 La tabla de la izquierda muestra la información origen-destino-impedancia. Los campos IDO e IDD corresponden al identificador único que se asignó a cada localidad con el fin de hacer vínculos para concatenar la información posteriormente.
Fuente: Elaboración del Autor.

El campo “Cost” es el tiempo en minutos necesario para trasladarse de la localidad de origen a la destino.

El siguiente paso es agregar la información de viajes y frecuencias a cada extremo de la matriz de impedancias. Para ello se concatenaron las tablas dos veces, la primera para vincular la información de los orígenes (CLAVE_U+IDO) y la segunda para los destinos (CLAVE_U+IDD). Esta operación se conceptualiza en la siguiente figura (4.43).

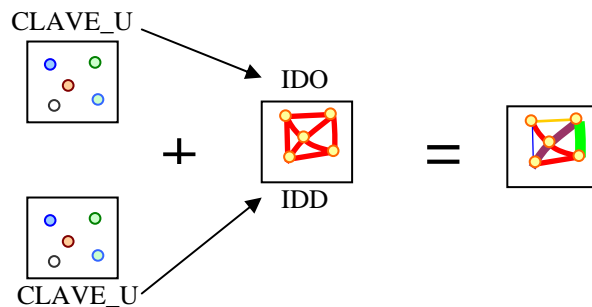


Figura 4.43 Operaciones de concatenación de tablas necesarias para obtener la estructura necesaria para el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Esta estructura permite contar en una misma base de datos con todas las variables requeridas para modelar:

- | | |
|----------------------------------|---------------------|
| Masas (V_i, W_j): | VIAJES_O y VIAJES_D |
| Impedancia (S_{ij}): | Cost |
| Exponentes (λ, α) | FMIN_O y FMIN_D |

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

El resultado obtenido se muestra a continuación en la tabla 4.11:

		<i>IDO:</i> Identificador único de la localidad de origen	<i>IDD:</i> Identificador único de la localidad de destino	<i>VIAJES_O:</i> Viajes producidos en la localidad de origen			<i>VIAJES_D:</i> Viajes producidos en la localidad de destino						
↓ ↓ ↓ ↓													
Análisis Gravitacional													
Shape	IDO	NOM_O	IDD	NOM_D	Cost	VIAJES_O	FMIN_O	FMAX_O	FPPROM_O	VIAJES_D	FMIN_D	FMAX_D	FPPROM_D
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	101	METEPEC	70.611	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	142663.27	0.5281	7.3691	1.0057
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	107	SANTA MARIA MAGDALENA OCOTILAN	71.530	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	6903.95	0.4667	0.9156	0.7495
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	104	SAN LORENZO COACALCO (SAN LORENZO)	71.591	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	1289.06	0.5190	0.7081	0.5943
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	106	SAN MIGUEL TOTOCUITLAPILCO	72.002	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	2093.09	0.5210	0.5381	0.5295
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	102	SAN BARTOLOME TLALTTELULCO	72.070	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	1886.70	0.5311	0.5311	0.5311
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	108	SAN MATEO MEXICALTZINGO	73.852	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	2456.53	0.5402	0.5605	0.5504
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	103	SAN GASPAR TLAHUELILPAN	75.158	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	3393.47	0.4787	0.8973	0.5957
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	128	SAN ANTONIO LA ISLA	76.902	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	2513.20	0.4738	0.5011	0.4887
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	105	SAN LUCAS TUNCO (SAN LUCAS)	76.975	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	3154.15	0.4539	0.4968	0.4754
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	125	COLONIA GUADALUPE VICTORIA	77.159	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	912.30	0.5264	0.5264	0.5264
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	127	SANTA MARIA RAYON	78.199	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	1890.81	0.4837	0.5037	0.4942
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	124	SAN PEDRO CHOLULUA	79.569	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	3707.40	0.5308	0.5770	0.5542
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	121	PEDREGAL DE GUADALUPE HIDALGO	81.923	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	6823.75	0.4646	0.5858	0.5246
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	100	SANTA MARIA ATARASQUILLO	83.002	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	4051.41	0.5117	0.5385	0.5272
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	122	SAN JERONIMO ACAZULCO	84.592	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	1127.73	0.4502	0.5229	0.4835
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	126	SANTA ANA JILOTZINGO	86.272	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	715.13	0.4541	0.4541	0.4541
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	123	SAN PEDRO ATLAPULCO	91.891	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	1262.81	0.5208	0.6041	0.5661
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	113	SAN FRANCISCO CHIMALPA	100.159	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	1881.29	0.5311	0.5311	0.5311
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	109	SAN LORENZO MALACOTA	103.109	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	256.51	0.3849	0.3849	0.3849
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	133	SAN ANTONIO DE LAS HUERTAS	104.482	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	272.23	0.4345	0.4345	0.4345
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	134	SAN AGUSTIN MEXTEPEC	105.625	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	578.64	0.4120	0.4120	0.4120
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	112	NAUCALPAN DE JUAREZ	105.699	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	337642.81	0.4833	3.7861	0.8224
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	132	EMILIO PORTES GIL	106.076	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	543.06	0.4519	0.4642	0.4581
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	114	SANTIAGO TEPATLAXCO	106.888	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	3912.66	1.6035	1.6035	1.6035
PolyLine	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	131	DOLORES HIDALGO	106.965	7644.48	0.4666	0.4666	0.4666	605.26	0.4748	0.4748	0.4748
↑ ↑													
		<i>NOM_O :</i> Nombre de la localidad de origen	<i>NOM_D :</i> Nombre de la localidad de destino	<i>Cost:</i> Impedancia (minutos de recorrido) entre el par o-d	<i>FMIN_O, FMAX_O, FPPROM_O :</i> Variables de frecuencia de la localidad de origen			<i>FMIN_D, FMAX_D, FPPROM_D :</i> Variables de frecuencia de la localidad de destino					

Tabla 4.11 Estructura de la matriz de impedancias con la información de orígenes y destinos concatenada. Fuente: elaboración propia.

Se procede a obtener para cada par de la base de datos su índice de interacción T_{ij} con la siguiente fórmula:

$$T_{ij} = \frac{V_i^\lambda W_j^\alpha}{S_{ij}}$$

El cálculo de T_{ij} corresponde a cada par origen-destino. Un desglose para el cálculo del primer par ($IDO = 1$; $IDD = 101$) de la imagen siguiente (figura 4.44) es:

$$T_{ij} = \frac{(7,644.48^{0.466}) * (142,663.27^{0.528})}{70.611} = \frac{64.859 * 527.2205}{70.611} = 484.2729$$

En la siguiente figura (4.44) se muestra el cálculo del índice de interacción Tij. Algunos campos de la tabla fueron omitidos buscando facilitar la representación de la información (como por ejemplo el nombre de las localidades de origen y destino, las frecuencias máximas y promedio).

Ísis Gravitacional									
ODO	ODD	Cost	VIAIES_O	FMIN_O	VIAIES_D	FMIN_D	Vij_1	Wja_1	Tij_1
1	101	70.611	7644.48	0.4666	142663.27	0.5281	64.8590	527.2205	484.2729
1	107	71.530	7644.48	0.4666	6903.95	0.4667	64.8590	61.9023	56.1292
1	104	71.591	7644.48	0.4666	1289.05	0.5190	64.8590	41.1368	37.2685
1	106	72.002	7644.48	0.4666	2093.09	0.5210	64.8590	53.7193	48.3900
1	102	72.070	7644.48	0.4666	1886.70	0.5311	64.8590	54.9194	49.4244
1	108	73.852	7644.48	0.4666	2458.53	0.5402	64.8590	67.8645	59.6006
1	103	75.158	7644.48	0.4666	3393.47	0.4787	64.8590	48.9913	42.2780
1	128	76.902	7644.48	0.4666	2513.20	0.4738	64.8590	40.8345	34.4397
1	105	76.975	7644.48	0.4666	3154.15	0.4539	64.8590	38.7385	32.6410
1	125	77.159	7644.48	0.4666	912.30	0.5264	64.8590	36.1590	30.3949
1	127	78.199	7644.48	0.4666	1890.81	0.4837	64.8590	38.4516	31.8921
1	124	79.569	7644.48	0.4666	3707.40	0.5308	64.8590	78.4264	63.9276
1	121	81.923	7644.48	0.4666	6823.75	0.4646	64.8590	60.4348	47.8466
1	100	83.002	7644.48	0.4666	4051.41	0.5117	64.8590	70.1475	54.8143
1	122	84.592	7644.48	0.4666	1127.73	0.4502	64.8590	23.6648	18.1444
1	126	86.272	7644.48	0.4666	715.13	0.4541	64.8590	19.7777	14.8688
1	123	91.891	7644.48	0.4666	1262.81	0.5208	64.8590	41.2265	29.0987

Figura 4.44 Base de datos con las variables utilizadas para modelar. Fuente: el autor.

Este índice corresponde a la intensidad de la relación entre todos los pares de nodos del sistema. Mientras más alto sea, implica que ese par de nodos tienen mayor interacción.

El paso siguiente es convertir los resultados de cada par Tij a la forma de probabilidad de interacción con ayuda de la siguiente fórmula:

$$T_{ij} \text{ prob \%} = \left[\frac{\frac{V_i^\lambda W_j^\alpha}{S_{ij}}}{\sum_{i,j=1}^n \frac{V_i^\lambda W_j^\alpha}{S_{ij}}} \right] * 100 = \left[\frac{T_{ij} \text{ de cada par o-d}}{\sum_{i,j=1}^n T_{ij} \text{ de todo el sistema}} \right] * 100$$

Esta forma de plantear el resultado permite cuantificar la importancia que tiene cada relación o-d respecto al total del sistema.

Para este estudio, la suma de Tij para los 48,841 pares od (221*221) es decir, todo el sistema fue de 1.41e+9 (1'410'137,488.87).

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

A continuación, en la figura 4.45 se expone una muestra de esa base de datos.

Análisis Gravitacional					
Shape	IDD	IDD	Cost	T_{ij}	T_{ij_prb}
PolyLine	1	101	70.611	484.2729	0.0000343422
PolyLine	114	11	28.605	185693411.4246	13.1684614366
PolyLine	11	114	28.605	185693411.4246	13.1684614366
PolyLine	7	114	27.497	64534833.2612	4.5764922761
PolyLine	8	114	37.841	56759971.0219	4.0251373692
PolyLine	6	114	36.651	42488625.3819	3.0130838813
PolyLine	64	114	17.503	31043731.0938	2.2014683915
PolyLine	5	114	16.567	30014017.6137	2.1284461870
PolyLine	114	112	13.449	20125307.5727	1.4271876134
PolyLine	112	114	13.449	20125307.5727	1.4271876134
PolyLine	67	114	12.274	17034918.1245	1.2080324266

Figura 4.45 Cálculo de la probabilidad de interacción entre cada par origen destino. Algunos campos fueron omitidos para facilitar la representación.

Fuente: Elaboración propia.

← T_{ij} prob %

Un desglose para el cálculo del primer par (IDO = 1; IDD = 101) de la imagen anterior es:

$$T_{ij} \text{ prob\%} = \left[\frac{484.2729}{1'410'137,488.87} \right] * 100 = 3.4342e-5$$

Este resultado se interpreta como: “la localidad 1 tiene una probabilidad de 0.000034 (3.43 e-5) de interactuar con la localidad 101”.

La suma de todos los valores de este campo de probabilidad T_{ij} dio el 100%.

Puesto que el fin de esta modelación gravitacional fue localizar aquellos nodos que tienen mayor interacción para diseñar las rutas terrestres, el siguiente paso fue hacer subtotales por origen para obtener la interacción total por nodo. En la siguiente figura (4.46) se explica este procedimiento:

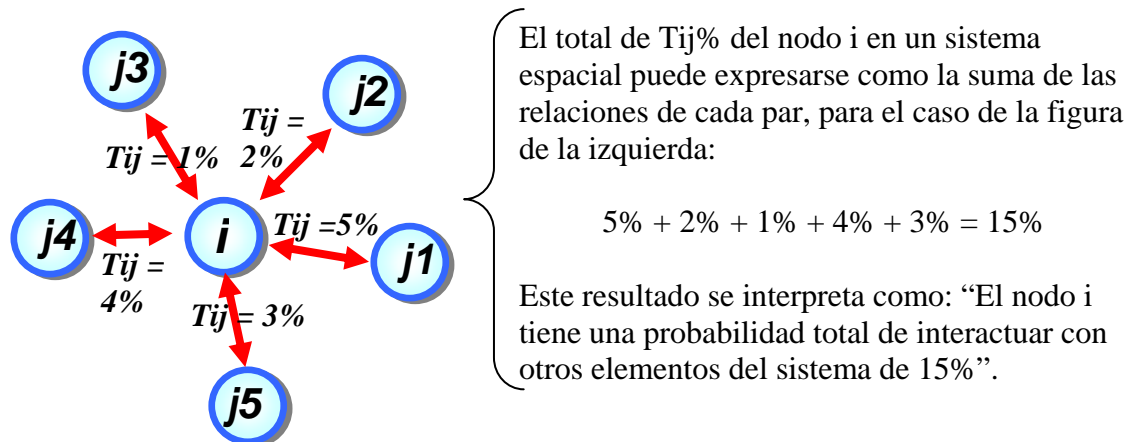


Figura 4.46 Se representa la probabilidad de interacción de i con las localidades j respecto al total de interacciones de todo el sistema. Fuente: Elaboración propia.

SUMARIZACIÓN DE RESULTADOS	
IDO	SUM_TIJ%
1	0.0264
2	0.1172
3	0.0538
4	1.0023
5	2.2296
6	3.2641

Figura 4.47 Muestra con 5 índices de interacción con los subtotales por origen. La suma de todos los valores de este campo (221 nodos) es igual al 100% de la probabilidad de todo el sistema.
Fuente: Elaboración propia.

Puesto que la suma de las probabilidades de interacción Tij% tienen el identificador único IDO, se hizo el vínculo a la base de datos de los nodos. Teniendo el siguiente resultado (figura 4.48):

Clave única del nodo que sirvió para hacer el vínculo. Probabilidad de interacción total del nodo

Interacción Total Tij%					
Shape	Cve_u	Nombre	Viajes	Min_frec	SUM_TIJ%
Point	1	TEJUPILCO DE HIDALGO	7644.48	0.466600000	0.0264
Point	2	VALLE DE BRAVO	11114.18	0.591800000	0.1172
Point	3	HEROICA ZITACUARO	21797.01	0.486800000	0.0538
Point	4	CUAJIMALPA DE MORELOS	89727.75	0.515613190	1.0023
Point	5	SAN LORENZO ACOPIICO	17516.37	0.631864516	2.2296
Point	6	MAGDALENA CONTRERAS, LA	314749.15	0.624214953	3.2641
Point	7	ALVARO OBREGON	255721.34	0.645095041	5.8628
Point	8	TLALPAN	324740.63	0.647977437	4.2414
Point	9	SAN MIGUEL AJUSCO	41306.45	0.592916667	0.5379
Point	10	SAN MIGUEL TOPILEJO	71447.06	0.590202931	0.5466
Point	11	MIGUEL HIDALGO	184466.57	0.752895522	14.7736
Point	12	ATOTONILCO DE TULA	2712.90	0.447265594	0.0279
Point	13	CONEJOS	654.68	0.442355751	0.0139
Point	14	VITO	1133.70	0.519078725	0.0326

Figura 4.48 Muestra de la Tabla de nodos con su probabilidad de interacción total.
Fuente: Elaboración propia.

Interpretación y representación de resultados obtenidos: contornos de isoprobabilidades

Como puede observarse en la siguiente figura (4.49), la probabilidad de interacción representada en forma puntual permite localizar con facilidad los nodos más importantes, sin embargo existe un problema para identificar la jerarquía de los nodos que tienen poca probabilidad de interacción. Por esta razón se utilizó un método para obtener áreas de isoprobabilidad que permitieron identificar patrones territoriales de interacción.

Los contornos de isoprobabilidades son generados mediante un proceso de interpolación en el SIG. Con ellos se identifican los gradientes de las interacciones en forma de superficie continua. Las superficies continuas, representan valores de elevación que van cambiando constantemente a medida que cambia la localización, constituyendo un gradiente espacial continuo.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

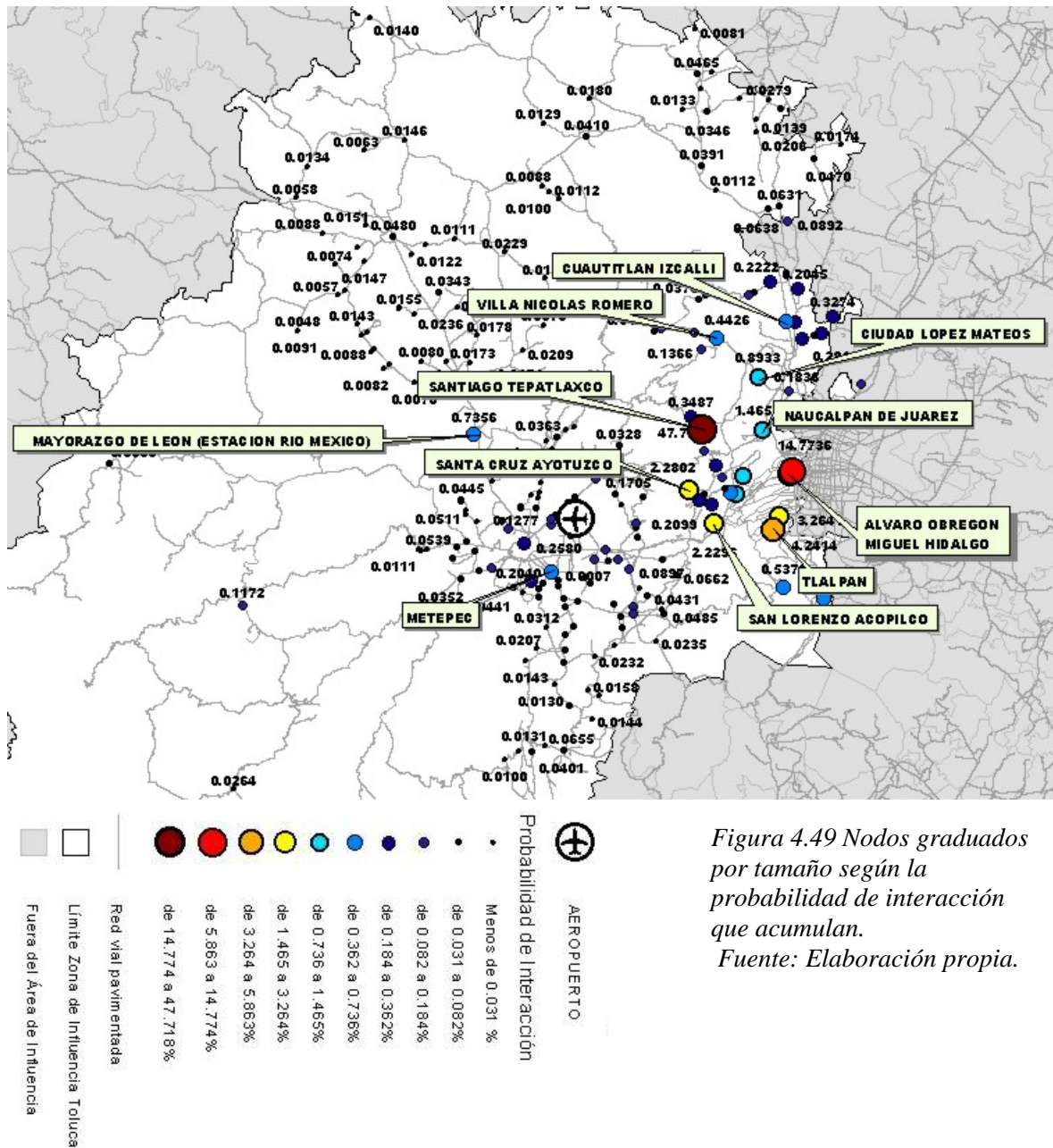
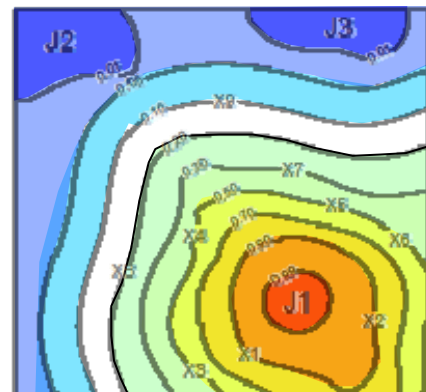


Figura 4.60 Arriba: tabla con la estructura topológica de la red de rutas óptimas. Los campos From Node, To Node y LineID son generados en el SIG automáticamente. Izquierda: Se muestra una porción de la red de rutas. El color de la línea distingue los segmentos delimitados por los nodos.

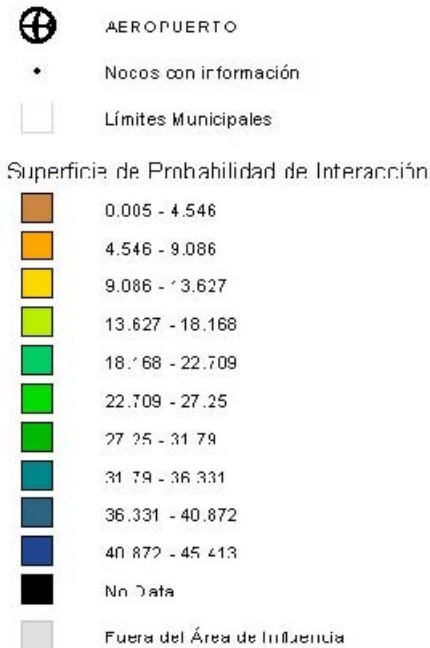
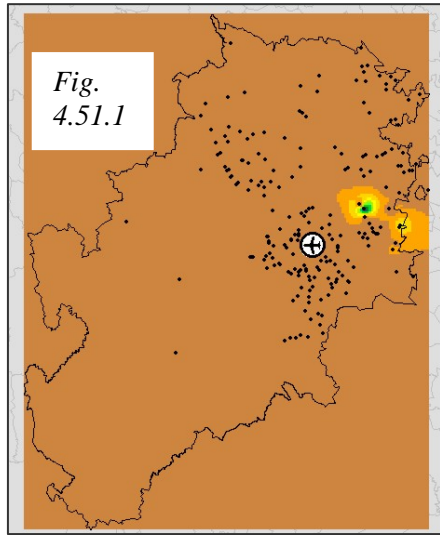
Fuente: El autor.

Figura 4.50 Contornos y regiones de isoprobabilidad.

Fuente: elaboración del autor.



Al hacer el proceso de interpolación de los valores del índice de interacción en el SIG, los resultados no son los óptimos:



Como se observa en las figuras 4.51.I y II (izquierda y abajo respectivamente), únicamente se distinguen las zonas con mayor interacción debido que el método de clasificación de los datos por defecto en el SIG son los cortes naturales (natural breaks). Además los límites de la zona de influencia del aeropuerto no son respetados por la interpolación, por lo que la consideración de un sistema cerrado no es representada. En la figura 4.51.II se aprecia una “disipación” del índice fuera de la zona en estudio.

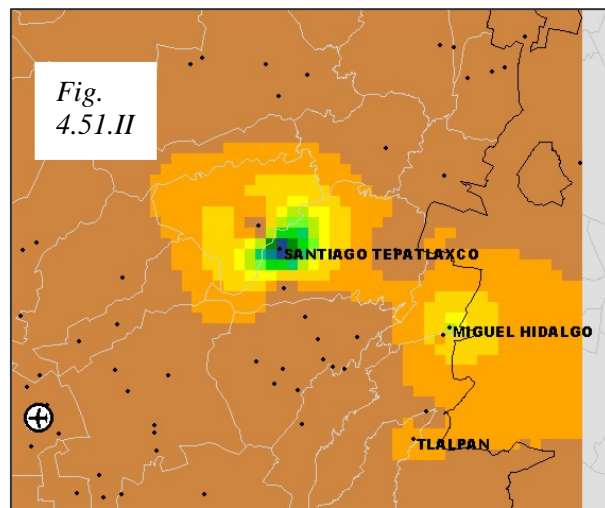


Figura 4.51 (I) Superficie de isoprobabilidad del total del área de influencia. (II) Acercamiento a la zona con mayor probabilidad. En la figura I se distingue que la interpolación rebasa los límites de influencia. Fuente: El autor.

Debido a estas deficiencias encontradas durante el proceso automático de interpolación fue necesario hacer uso de dos criterios espaciales:

En primer lugar, para simular que la zona de influencia del aeropuerto se trata de un sistema cerrado, fue necesario generar a lo largo de los límites valores muy cercanos a *interacción cero* con el fin de hacer que el proceso de interpolación se asemeje más a los razonamientos establecidos al principio del problema.

Para esto se hizo una *conversión topológica* de línea a punto del límite de la zona de influencia como se muestra en la siguiente figura (4.52).

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

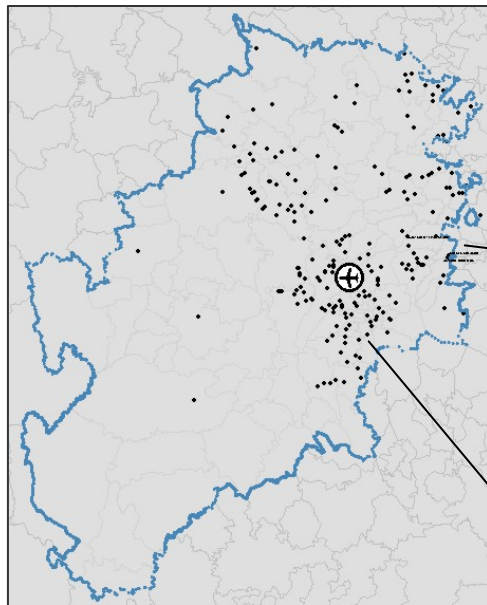
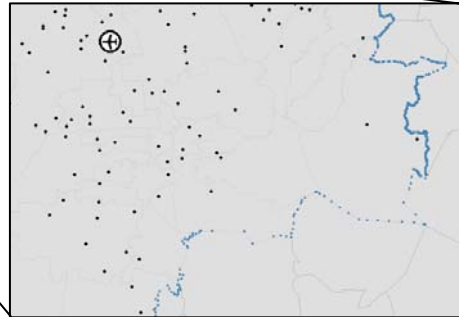


Figura 4.52 Tras la conversión topológica de los límites de la zona de influencia del aeropuerto (azul) se asignaron valores cercanos a cero al índice de interacción de estos puntos con el fin de que el proceso de interpolación refleje la situación del sistema cerrado.

Fuente: El autor.



De esta forma el total de puntos a interpolar paso de 221 (nodos originales con los que se calculó la interacción) a 9,334 que incluyen los vértices de las polilíneas que son los límites.

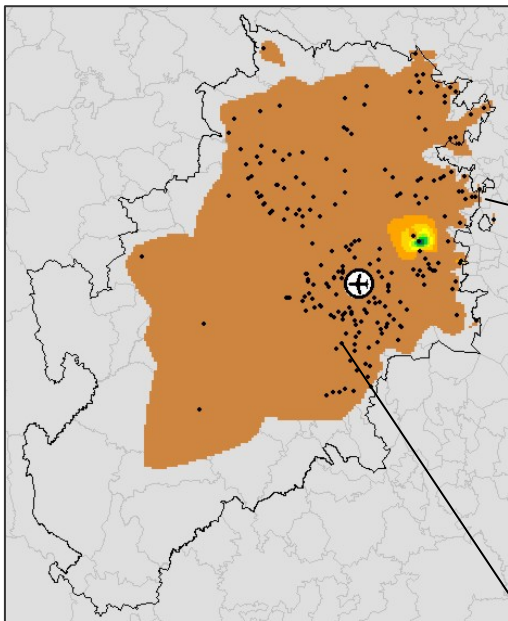
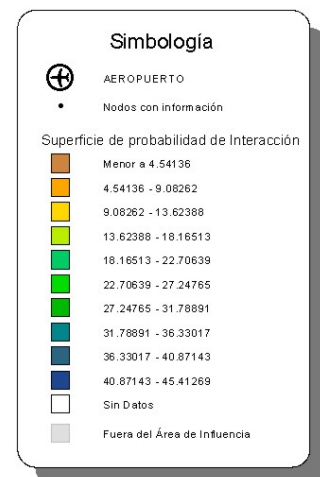
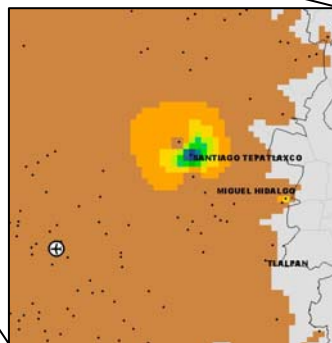


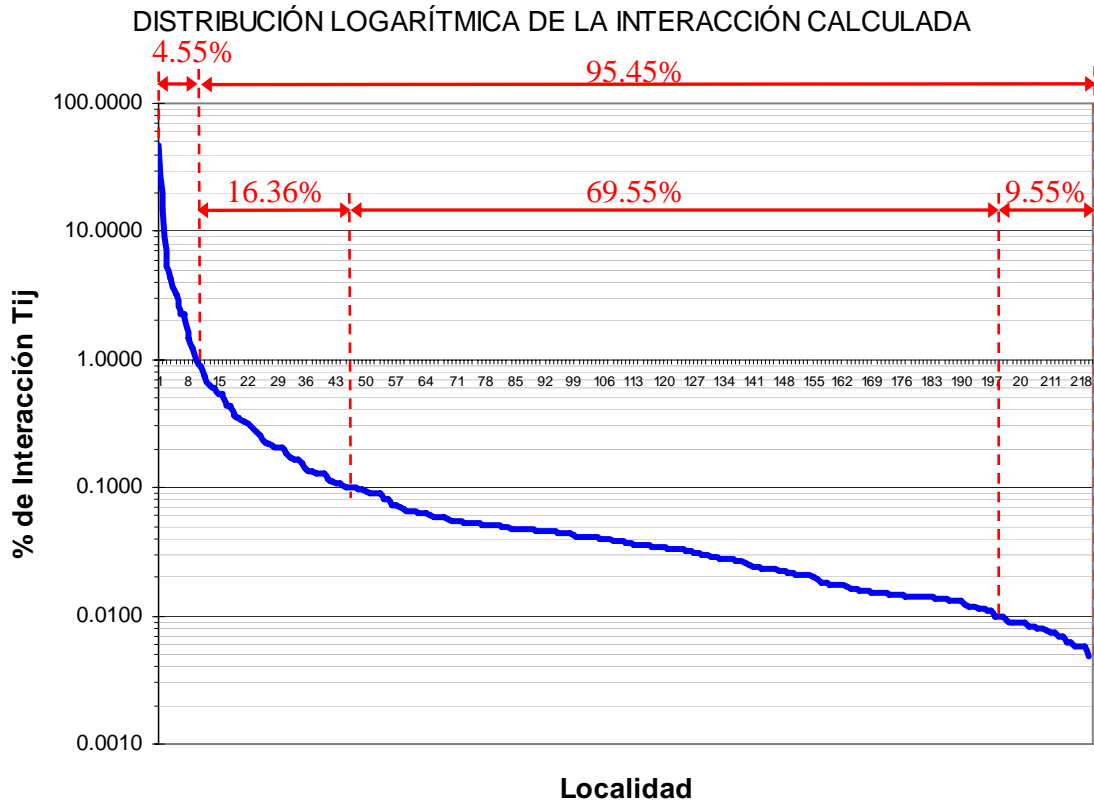
Fig. 4.53 Se aprecia que después de utilizar este procedimiento, la interpolación respeta los límites del área de influencia.

Fuente: El autor.



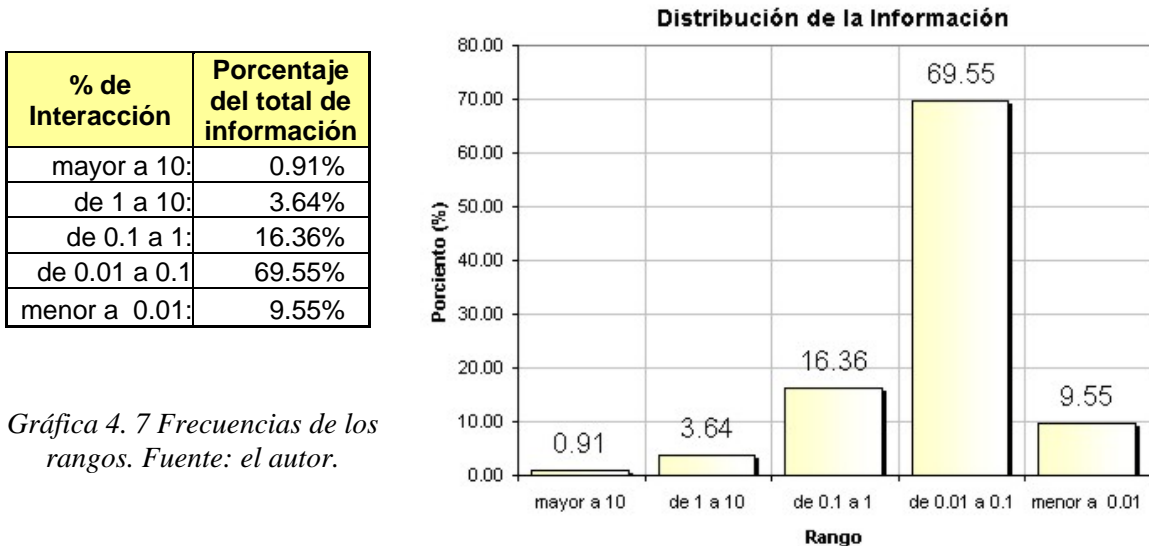
Pese a la consideración anterior, el “espectro visible” según la clasificación de cortes naturales en el SIG es menor al 4.55% del total de la información.

Con el fin de identificar los patrones territoriales del índice de interacción fue necesario calibrar los intervalos de clasificación con ayuda de la siguiente gráfica (4.6), que muestra la distribución logarítmica de la probabilidad de interacción calculada.



Gráfica 4.6 Distribución logarítmica de la interacción calculada para los 221 nodos. Fuente: El autor.

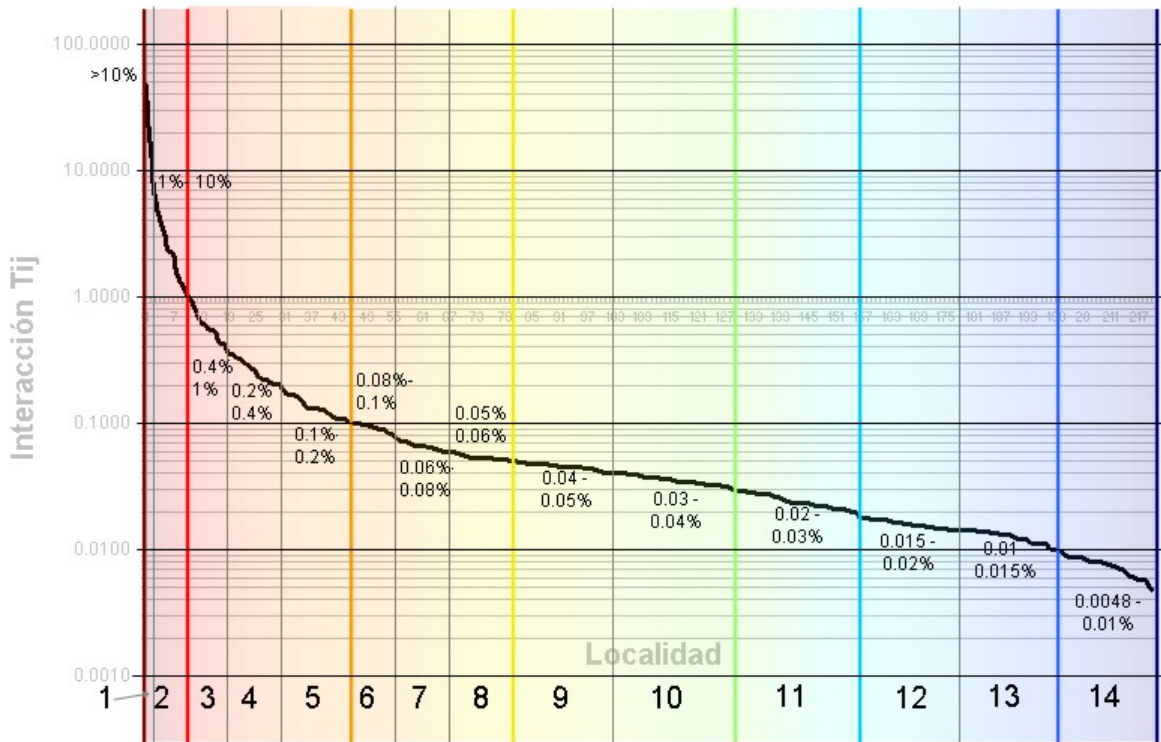
En la gráfica siguiente (4.7) se observa que el 70% de la información esta contenida en el rango de 0.01 a 0.1% y el 16.36% del total en el rango de 0.1 a 1%.



Gráfica 4.7 Frecuencias de los rangos. Fuente: el autor.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Se procede a establecer intervalos representativos para el conjunto de valores T_{ij} con la finalidad de que el mapa de isoprobabilidades refleje este comportamiento (gráfica 4.8).



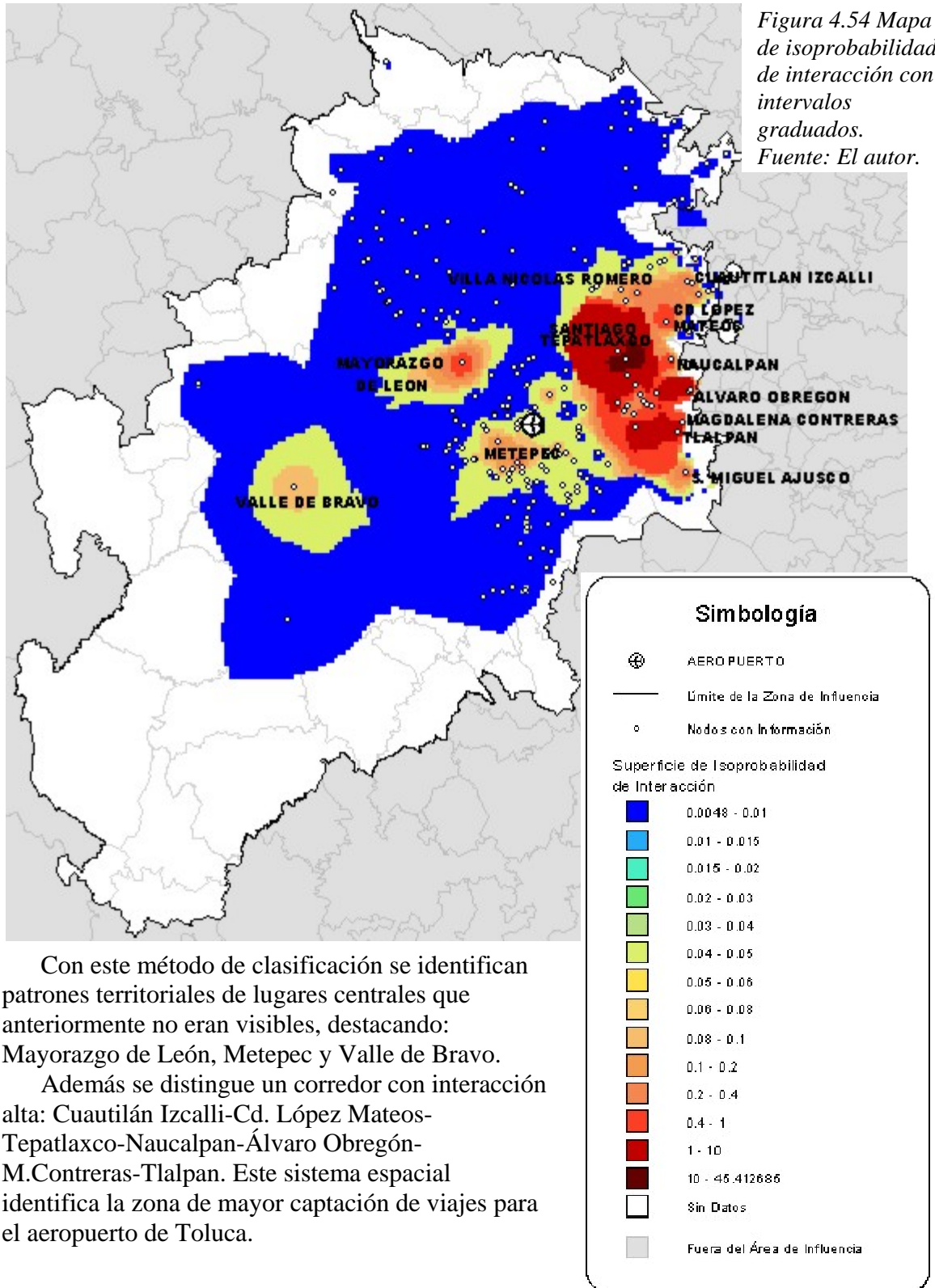
Gráfica 4.8 Intervalos de magnitud de interacción hechos a partir de la distribución logarítmica de la probabilidad de interacción. Fuente: Elaboración propia.

ID	Rango (%)
1	> 10
2	1 - 10
3	0.4 - 1
4	0.2 - 0.4
5	0.1 - 0.2
6	0.08 - 0.1
7	0.06 - 0.08
8	0.05 - 0.06
9	0.04 - 0.05
10	0.03 - 0.04
11	0.02 - 0.03
12	0.015 - 0.02
13	0.01 - 0.015
14	0.0048 - 0.01

Tabla 4.12 Rangos propuestos a partir de los intervalos de magnitud de interacción logarítmicos. Se distinguen 14 rangos básicos que engloban la totalidad de los datos. Es necesario verificar la representación de este criterio y hacer los ajustes necesarios.

Fuente: el autor.

Los 14 rangos de la tabla 4.12 se utilizaron para hacer una primera representación calibrada por rangos que se muestra en la figura siguiente (4.54).



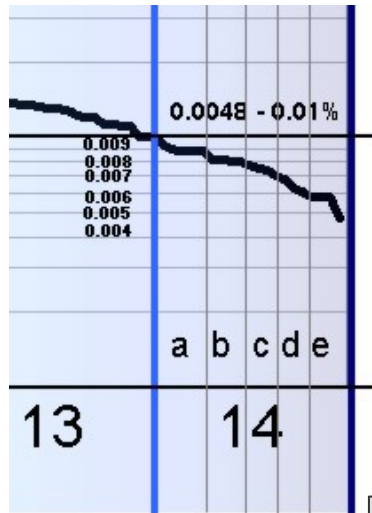
Con este método de clasificación se identifican patrones territoriales de lugares centrales que anteriormente no eran visibles, destacando: Mayorazgo de León, Metepec y Valle de Bravo.

Además se distingue un corredor con interacción alta: Cuautlán Izcalli-Cd. López Mateos-Tepatlaxco-Naucalpan-Álvaro Obregón-M. Contreras-Tlalpan. Este sistema espacial identifica la zona de mayor captación de viajes para el aeropuerto de Toluca.

Otro aspecto importante es que el intervalo de interacción que comprende de 0.0048 a 0.01% necesita reclasificarse para identificar la jerarquía de ese conjunto de nodos.

4. EL MODELO GRAVITACIONAL DE INTERACCIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA PLANEACIÓN DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Se muestra a continuación (figura 4.55) un acercamiento a la gráfica 4.8 para los valores que corresponden a ese rango.

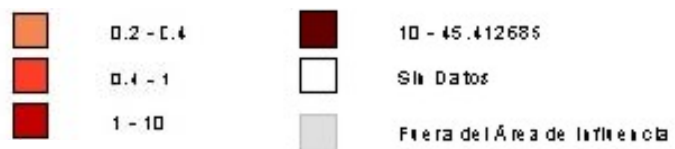
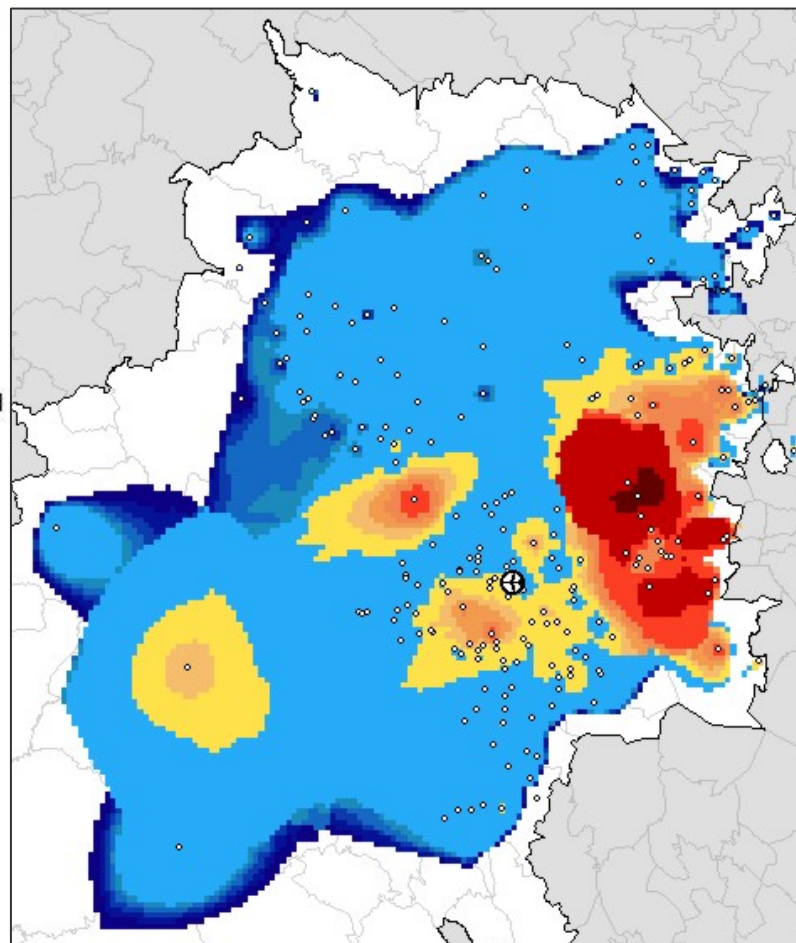
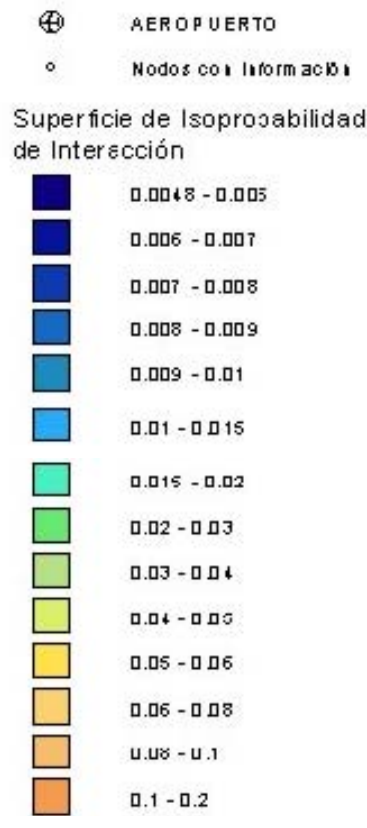


El intervalo 14 de la gráfica de distribución logarítmica comprende los valores de 0.0048 a 0.01%. Como se observa en la figura 4.60 es una región conformada por nodos muy dispersos. Con el fin de visualizar el patrón de estas interacciones de mínima intensidad se agregarán 5 intervalos más:

ID	Rango (%)
14-a	0.009 – 0.01
14-b	0.008 – 0.009
14-c	0.007 – 0.008
14-d	0.006 - 0.007
14-e	0.004 – 0.006

Interacción
Extremadamente
Baja

Figura 4.55 Arriba: Graduación del intervalo 14 de la gráfica 4.8. Derecha: Visualización de la graduación.
Fuente: Elaboración propia.



Se repite el procedimiento anterior para afinar los intervalos de 0.011 a 0.040 obteniendo el siguiente resultado de la figura 4.56.

Diseño de rutas de transporte utilizando el índice de interacción gravitacional y la jerarquía de segmentos de la red óptima

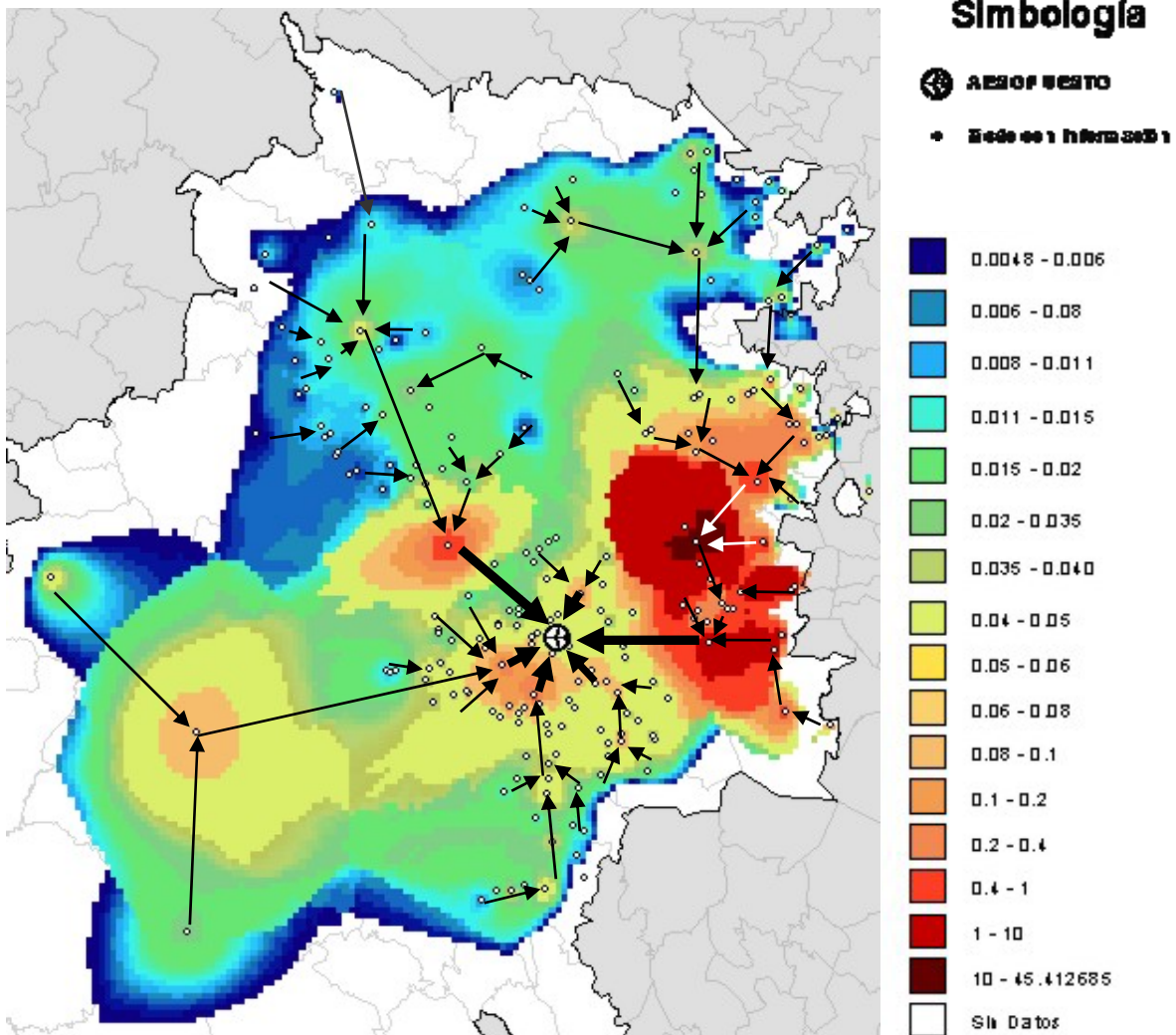
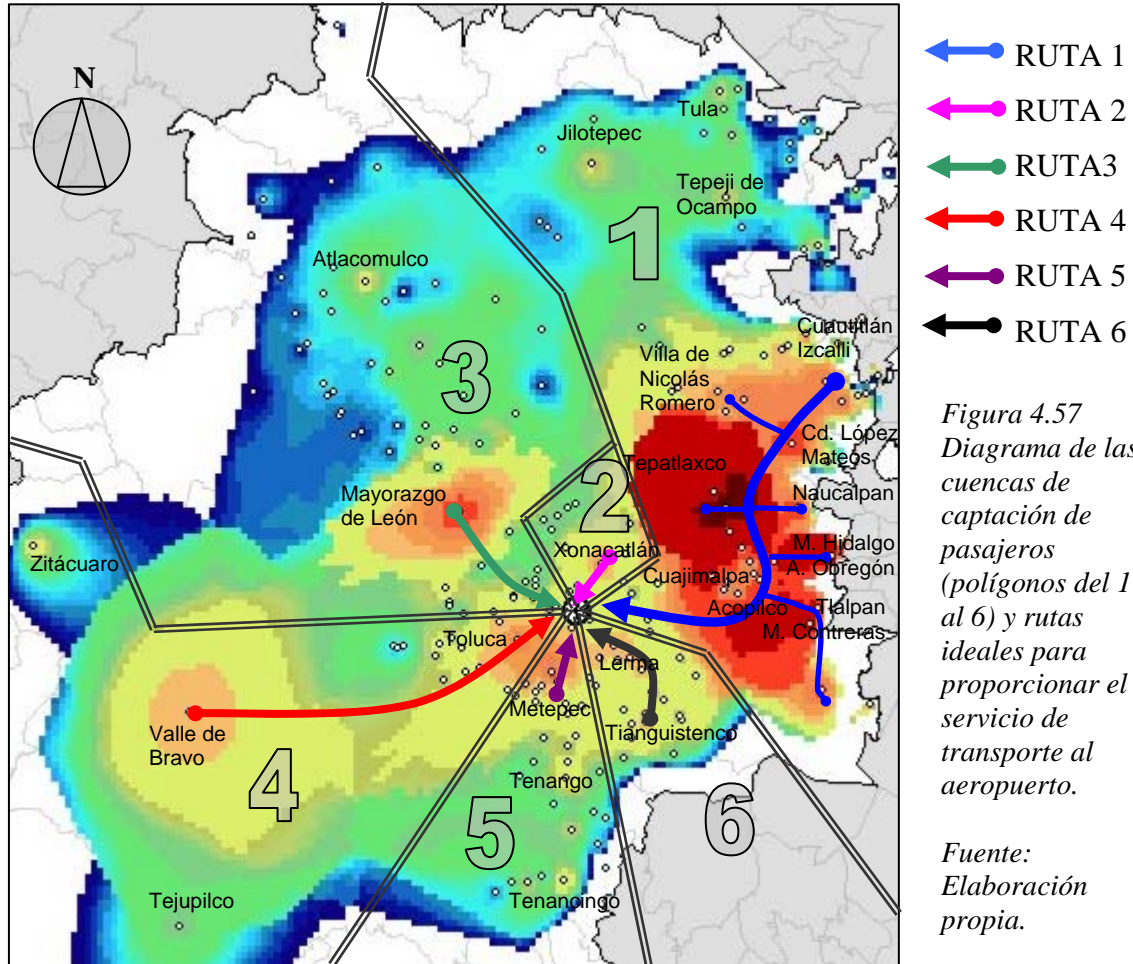


Figura 4.56 Mapa de isoprobabilidad de interacción con intervalos graduados.
Fuente: Elaboración propia.

En este mapa de isoprobabilidades (4.56) se distinguen los subsistemas de lugares centrales que antes no eran visibles. Con esta información se procedió al diseño de las rutas con destino al aeropuerto de Toluca. Las flechas de la figura anterior siguen el procedimiento de Kansky modificado por Kolars y Malin¹¹ para determinar la configuración ideal del sistema de transporte. Al principio se unieron todas las “cimas” del mapa de interacción trazando una línea recta entre la “cima” más baja y las más alta (para

¹¹ Vea el capítulo 3 “Modelo gravitacional de Kolars y Malin para la simulación de construcción de redes”. Páginas 102 et seq.

la que la interacción calculada con ayuda del modelo gravitacional tiene el valor más elevado). Este procedimiento se repite hasta que se agoten todas las posibilidades, luego se suprimen las líneas paralelas por ser ineficaces. Con este procedimiento se definieron 6 rutas principales con un recorrido “ideal” pues no se considera la infraestructura existente (Figura 4.57).



Se identifica la **zona 1** como la más importante del sistema por su relación extensión/interacción. Se propone la ruta 1 con un troncal principal conformado por el corredor Cuautitlán Izcalli-Cd. López Mateos-Tepatlaxco, Naucalpan-Cuajimalpa-S. L. Acapulco. También se plantea también añadir 5 ramales a esta ruta que tienen como fin incorporar las zonas de interacción alta: Villa de Nicolás Romero, Cd. López Mateos, Tepatlaxco, Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón, Tlalpan y Magdalena Contreras. Referente a las localidades dispersas con poca interacción como Tula, Jilotepec y Tepeji de Ocampo, también se propone generar ramales, sin embargo es necesario analizar las vías utilizadas para proponer el mejor recorrido. La **zona 2** comprende un área pequeña cuyo lugar de mayor interacción es Xonacatlán, que puede servir como un centro recolector de pasajeros para las localidades periféricas. Este lugar se encuentra a 12 km. aproximadamente del aeropuerto.

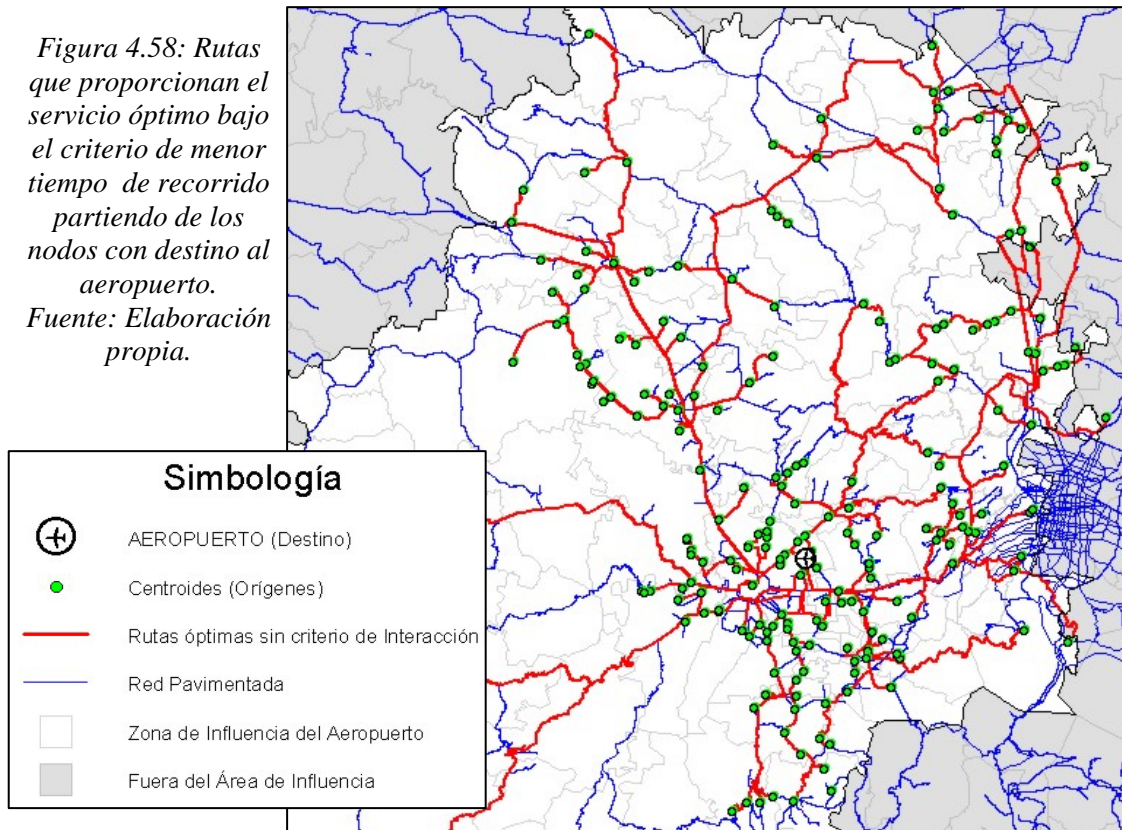
La **zona 3** tiene amplia extensión hacia el noroeste. Es de notar que la mayor proporción de las localidades incluidas en esta zona se encuentran más allá del lugar de mayor interacción, Mayorazgo de León. Aunque esta localidad puede servir como centro recolector, es necesario hacer un análisis más detallado de la cantidad de pasajeros y las vías utilizadas para determinar posibles ramales. La **zona 4** contiene a Toluca, que tiene una relación natural con el aeropuerto. Destaca por su nivel de interacción Valle de Bravo –a 62 km. de la capital del estado de México, lugar que puede funcionar como centro colector. Semejante que en la zona 3, es necesario detallar el número de pasajeros que puede captar este sitio para tomar la decisión de utilizarlo como terminal del servicio.

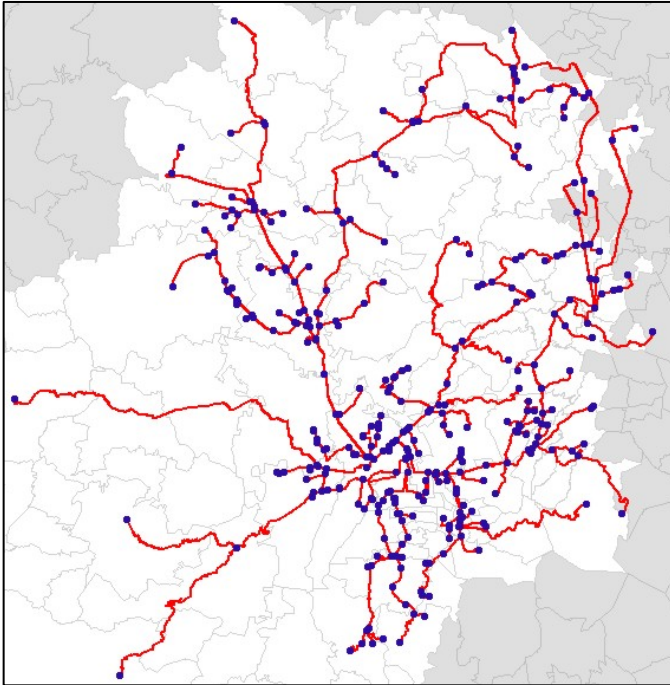
La **zona 5** tiene como lugar central a Metepec –a unos 14 km. del aeropuerto. Se propone servicio directo a partir de esta localidad. Otras localidades periféricas dispersas como Tenancingo y Tenango tendrían que acceder a este sitio. La **zona 6** cuenta con varias localidades en el mismo rango de interacción: Lerma de Villada, San Mateo Atenco, San Pedro Cholula, Capulhuac de Mirafuentes y Santiago Tianguistengo, todas se encuentran en promedio a 15 km. de distancia del aeropuerto. Puesto que no se identifica un lugar central, probablemente se incorporarán al recorrido de la ruta 1 como otro ramal.

El siguiente paso consistió en adecuar estas propuestas a la red vial pavimentada para determinar el recorrido exacto de las distintas rutas. Para llevar a cabo este objetivo se empleó la siguiente metodología:

1. Se hizo un análisis de rutas óptimas *todos a uno* con origen en los nodos y destino en el aeropuerto (figura 4.58) con el fin de identificar los segmentos de red que brindan mayor conectividad:

*Figura 4.58: Rutas que proporcionan el servicio óptimo bajo el criterio de menor tiempo de recorrido partiendo de los nodos con destino al aeropuerto.
Fuente: Elaboración propia.*





2. Se obtuvieron las intersecciones y los nodos de la red de rutas óptimas, obteniendo lo que se muestra en la figura de la izquierda (4.59).

Simbología

- Nodos e Intersecciones
- Rutas óptimas sin criterio de Interacción
- Zona de Influencia del Aeropuerto
- Fuera del Área de Influencia

Figura 4.59 Nodos e intersecciones de la red de rutas óptimas. Fuente: El autor.

3. El siguiente paso consiste en segmentar la red de rutas óptimas en los lugares donde existen nodos o intersecciones. Posteriormente se genera topología arco nodo (Figura 4.60):

Attributes of Ro_split.shp									
Shape	Origin ID	Destination ID	Origin Label	Destination Label	Cost	From Node	To Node	LineID	
PolyLine	0	195	AEROPUERTO	SAN MIGUEL TOTOLTEPEC	0.447	113	217	1	
PolyLine	0	191	AEROPUERTO	SAN PEDRO TOTOLTEPEC	2.145	112	217	2	
PolyLine	0	191	AEROPUERTO	SAN PEDRO TOTOLTEPEC	2.145	112	217	3	
PolyLine	0	191	AEROPUERTO	SAN PEDRO TOTOLTEPEC	2.145	112	217	4	
PolyLine	0	191	AEROPUERTO	SAN PEDRO TOTOLTEPEC	2.145	112	217	5	
PolyLine	0	185	AEROPUERTO	SAN JOSE GUADALUPE (SAN	2.371	97	217	6	
PolyLine	0	185	AEROPUERTO	SAN JOSE GUADALUPE (SAN	2.371	97	217	7	

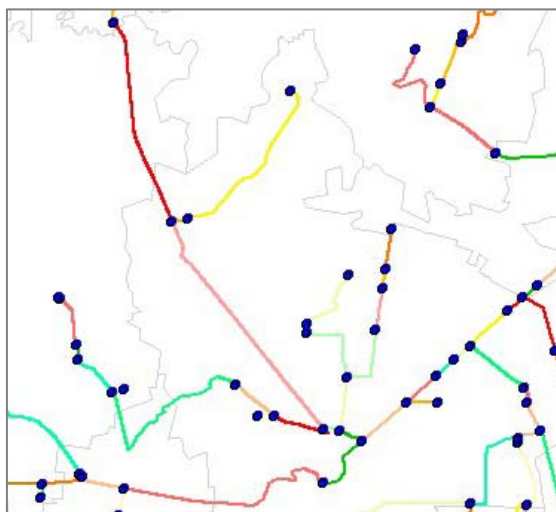


Figura 4.60 Arriba: tabla con la estructura topológica de la red de rutas óptimas. Los campos From Node, To Node y LineID son generados en el SIG automáticamente. Izquierda: Se muestra una porción de la red de rutas. El color de la línea distingue los segmentos delimitados por los nodos.

Fuente: El autor.

En la siguiente figura (4.61) se muestra el mapa con la jerarquía¹² donde se indica con número la cantidad de nodos que conecta cada arco. Se hizo una clasificación visual de 6 cuadrantes tomando como criterio de agrupación estos valores. Como se observa, el cuadrante 4 concentra los valores de mayor conectividad, en segundo lugar están los cuadrantes 2 y 6 y en último lugar los cuadrantes 1, 3 y 5.

Jerarquía de Arcos

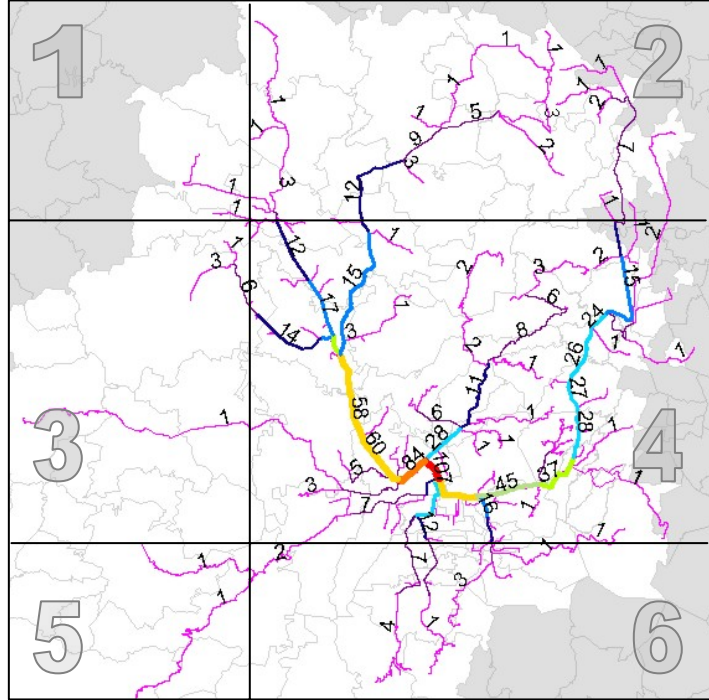
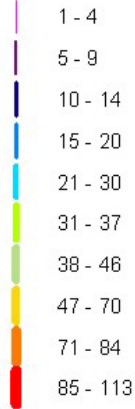
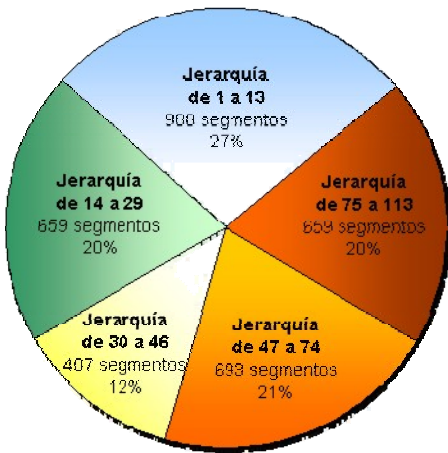


Fig. 4.61 Mapa de jerarquía de los arcos de la red de rutas óptimas. El grosor y el color indican el número de rutas óptimas que pasan por cada segmento, es decir, el número de nodos que conecta cada arco. Fuente: El autor.

La red de rutas óptimas contiene un total de 3,326 segmentos. El patrón estadístico de la jerarquía de estos se muestra a continuación en la gráfica 4.9. Los rangos de jerarquía están definidos según el método de cortes naturales.

Relación de la Jerarquía de Segmentos



RANGO	No. de Segmentos	% de la red	% Acumulado
75 a 113	659	19.81%	100.00%
47 a 74	693	20.84%	80.19%
30 a 46	407	12.24%	59.35%
14 a 29	659	19.81%	47.11%
1 a 13	908	27.30%	27.30%
total	3,326	100.00%	

Gráfica 4.9 El 60% del total de segmentos de rutas óptimas tienen una jerarquía menor a 46 conexiones, en comparación el 20% hace de 75 a 113 conexiones. Fuente: Elaboración propia.

¹² Para los procesos de los pasos 2 y 3 se utilizaron las extensiones P/PL-Tools (Polyline nodes extractor, Polyline unnoded intersections to points and Split Polylines at points) y Arc/Node Topology, ambas se pueden descargar gratuitamente del sitio de ESRI (www.esri.com).

El criterio de jerarquía de los arcos óptimos proporciona una segunda impresión sobre los ejes troncales de las rutas de servicio terrestre. En la figura 4.62, en el cuadrante 4 se distinguen 5 rutas:

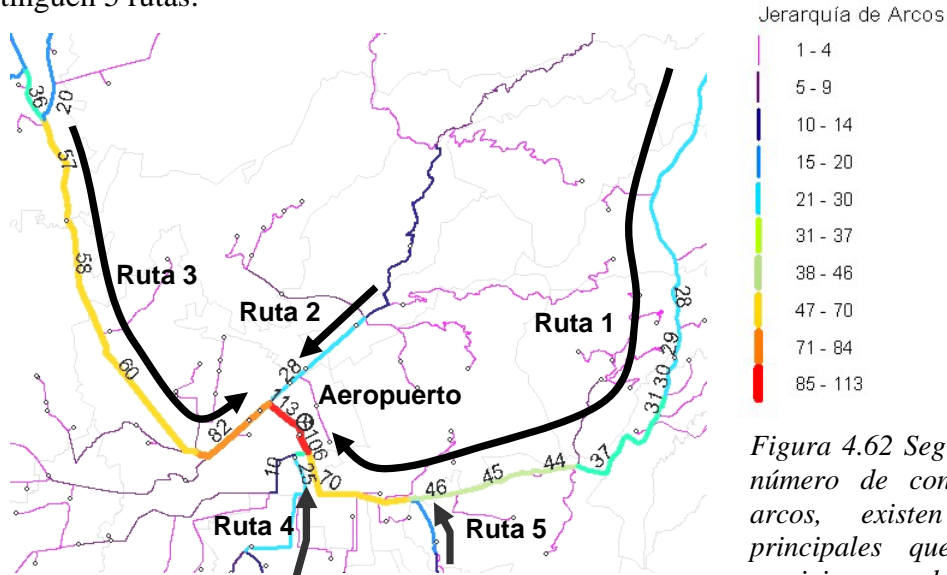


Figura 4.62 Según el criterio de número de conexiones de los arcos, existen cinco rutas principales que alimentan el servicio en el aeropuerto de Toluca. Fuente: El autor.

Sobreponiendo el análisis gravitacional y el de jerarquía de segmentos se obtiene el siguiente mapa:

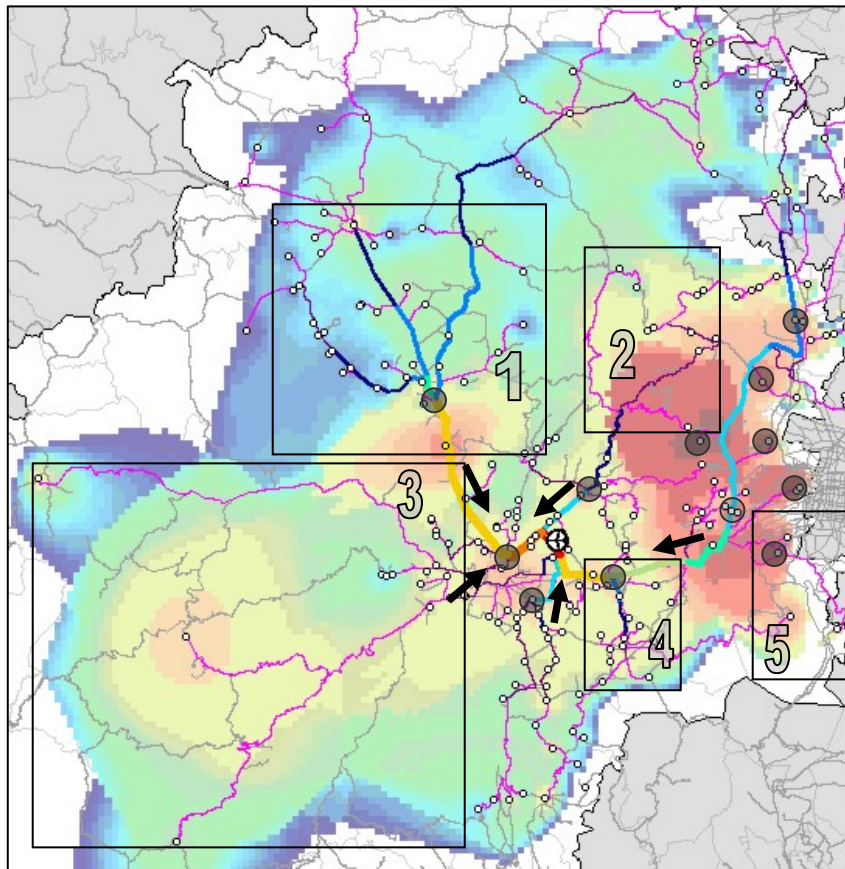
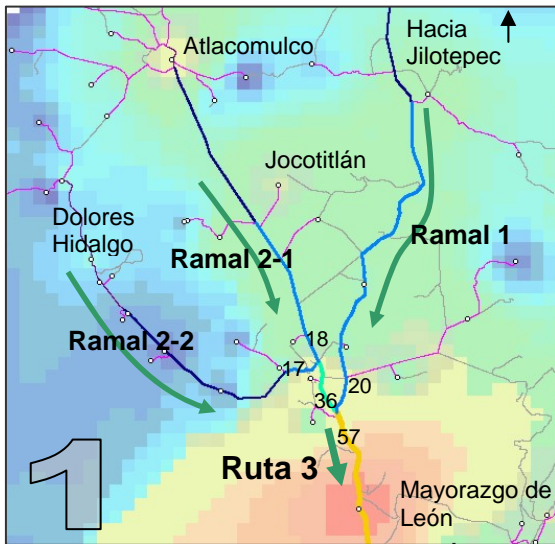


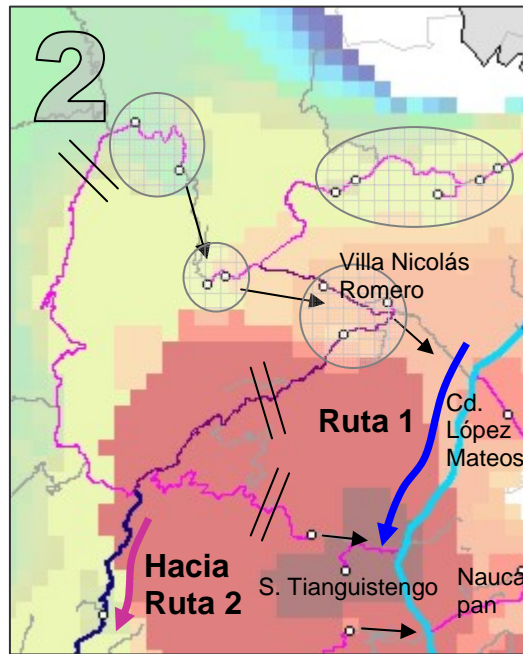
Figura 4.63 Mapa de interacción gravitacional y criterio de jerarquía de arcos óptimos. Aplican las simbologías antes mostradas. Fuente: El autor.

- Lugar Central de interés
- ← Ruta de Transporte

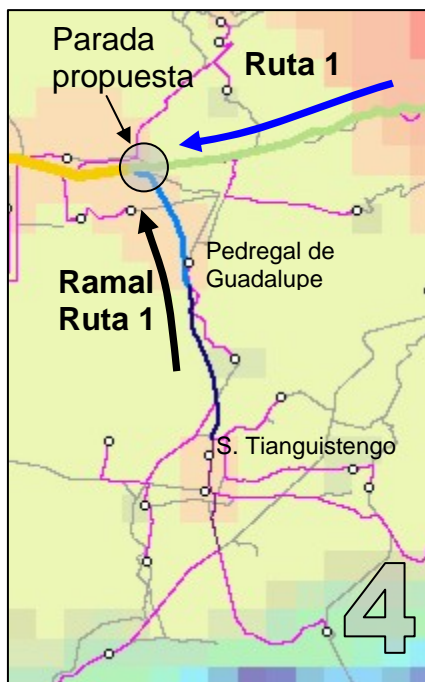
A continuación se explica el mapa anterior (4.63). Los rectángulos dibujados en el mapa indican regiones de interés:



Recuadro 1 de la figura 4.63. Como se mencionó anteriormente, Mayorazgo de León puede funcionar como un centro recolector de pasajeros para la ruta 3. Se definen dos ramales alimentadores: Jilotepec con 20 localidades conectadas y Atlacomulco con 36. Es necesario analizar la demanda a bordo para determinar si es necesario implementar el servicio de los ramales. Fuente: El autor.

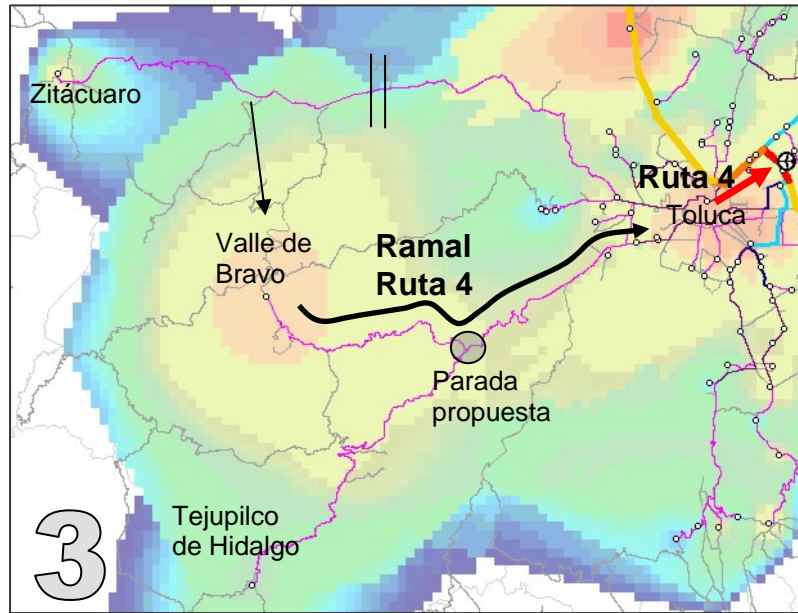


Recuadro 2 de la figura 4.63. En esta región existe una discrepancia entre el criterio gravitacional y el de arcos óptimos. Los nodos que se encuentran resaltados con \bigcirc son asignados por arcos óptimos a la ruta 2, sin embargo se encuentran más próximos a los lugares centrales incluidos en la ruta 1. Por esta razón, en este caso pesa el criterio del modelo gravitacional. Las flechas negras indican la asignación. Fuente: El autor.

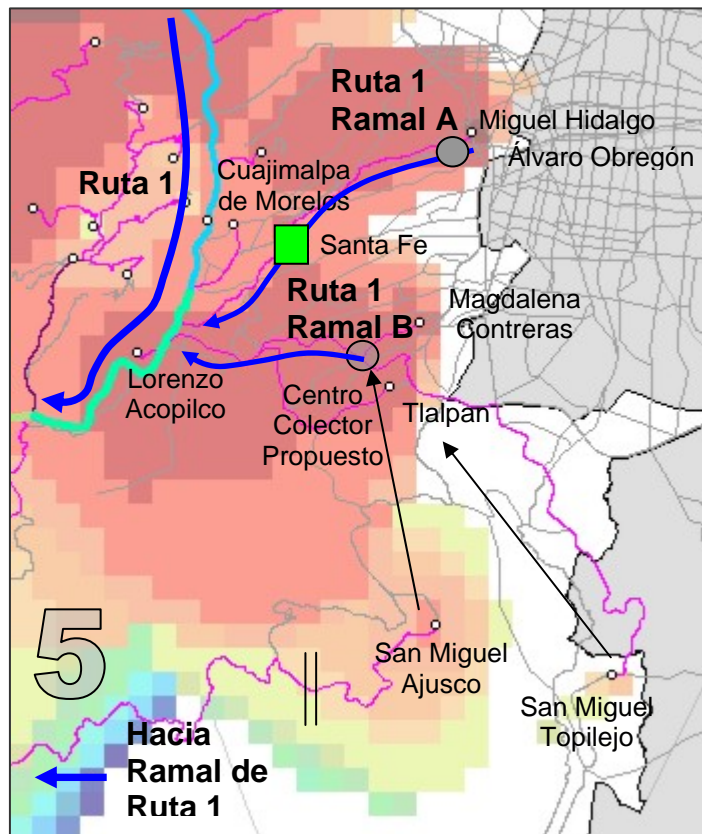


Recuadro 4 de la figura 4.63: La ruta 6 propuesta en el criterio gravitacional (Tianguistengo-Lerma-Aeropuerto) se identifica con el criterio de arcos óptimos como ramal de la ruta 1. En la figura se indica con un círculo la parada propuesta que servirá para coleccionar a los pasajeros provenientes de ese ramal. Fuente: El autor.

Recuadro 3 de la figura 4.63. Se define el recorrido del ramal de la ruta 4 que parte desde Valle de Bravo hasta la ciudad de Toluca. Por criterio de ruta óptima, los viajeros provenientes de Zitácuaro optan por otro recorrido, sin embargo es conveniente asignarlos a Valle de Bravo. También se propone una parada para recolectar a los viajeros provenientes de Tejupilco. La justificación de este ramal será si la demanda a bordo es suficiente.
Fuente: El autor.



Recuadro 5 de la figura 4.63. Todas las localidades de esta región corresponden a la ruta 1. Nodos generadores de buena cantidad de viajes y de interacción alta son Miguel Hidalgo, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Tlalpan, por lo que pueden constituir 2 ramales (A y B). Las localidades Ajusco y Topilejo serían asignadas al ramal B.
Fuente: El autor.



Estos ajustes sugeridos para el diseño de los recorridos de las rutas son preliminares, obviamente las versiones finales dependerán de las características propias de los lugares y del presupuesto disponible. Por ejemplo, para la propuesta hecha en el recuadro 5, la zona comercial de Santa Fe podría ser un lugar natural para establecer una terminal recolectora de pasajeros y conformar un solo ramal en lugar de dos.

A continuación se muestra un mapa que muestra las rutas principales y sus ramales, así como terminales y paradas propuestas (Figura 4.64).

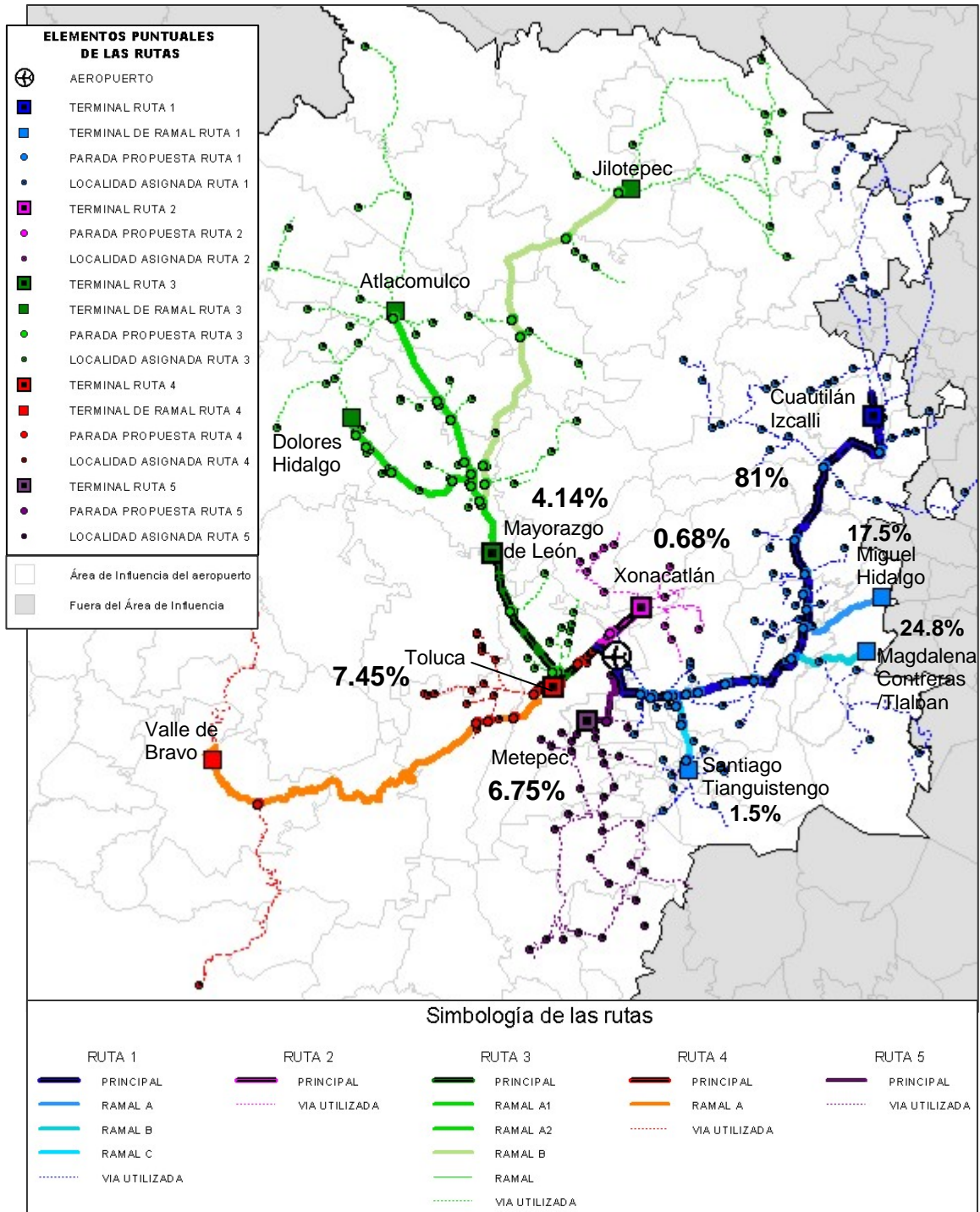


Figura 4.64 Sistema de 5 rutas propuestas para satisfacer la demanda pronosticada del aeropuerto de Toluca. Fuente: El autor.

Resumiendo, se propusieron 5 rutas:

1. Cuautitlán Izcalli-Aeropuerto, con tres ramales
 1. A Miguel Hidalgo
 1. B Magdalena Contreras/Tlalpan
 1. C Santiago Tianguistenco
2. Xonacatlán-Aeropuerto
3. Mayorazgo de León-Aeropuerto, con dos ramales
 3. A Atlacomulco/Dolores Hidalgo
 3. B Jilotepec
4. Toluca-Aeropuerto, con un ramal
 4. A Valle de Bravo
5. Metepec-Aeropuerto

En la figura anterior (4.64), también se expresa un porcentaje que indica el aporte de la demanda que satisface cada ruta propuesta, en la siguiente tabla (4.13) se muestra el desglose de la información.

RUTA	TOTAL DE USUARIOS/AÑO	%	RANK
1. Cuautitlán Izcalli-Aeropuerto	3,029,108.54	80.98%	1
4. Toluca-Aeropuerto	278,505.96	7.45%	2
5. Metepec-Aeropuerto	252,644.27	6.75%	3
3. Mayorazgo de León-Aeropuerto	154,970.01	4.14%	4
2. Xonacatlán-Aeropuerto	25,458.47	0.68%	5
<i>TOTAL</i>	3,740,687.25	100.00%	

Tabla 4.13 Información estadística de las rutas del aeropuerto de Toluca. Fuente: El autor.

La ruta 1 (Cuautitlán-Aeropuerto) con sus tres ramales satisface el 80% de la demanda anual pronosticada del aeropuerto de Toluca. A continuación se hace un desglose (tabla 4.14) del aporte que hace cada ramal.

RAMAL	USUARIOS/AÑO	%	RANK
RAMAL B (M. CONTRERAS/TLALPAN)	752,243.29	24.83%	1
RAMAL A (MIGUEL HIDALGO/A. OBREGÓN)	529,915.66	17.49%	2
RAMAL C (SANTIAGO TIANGUISTENCO)	45,324.99	1.50%	3
<i>TOTAL RAMALES RUTA 1</i>	1,327,483.94	43.82%	
<i>TOTAL RUTA 1</i>	3,029,108.54		

Tabla 4.14 Información estadística de los ramales de la ruta 1. Fuente: El autor.

A continuación en la figura 4.65 se muestra un análisis de grafos que se hizo en el SIG para la ruta 1 y sus ramales. Incluye la cantidad de usuarios a bordo por segmento, ascensos en terminales y paradas propuestas. Este análisis implicó dar topología a los segmentos de la ruta atendiendo el sentido de circulación y la conectividad de los nodos, posteriormente se asoció la información de viajes pronosticados a los arcos y se hizo la suma acumulada para obtener el resultado final mostrado en la tabla 4.15.

Grafo de la ruta 1

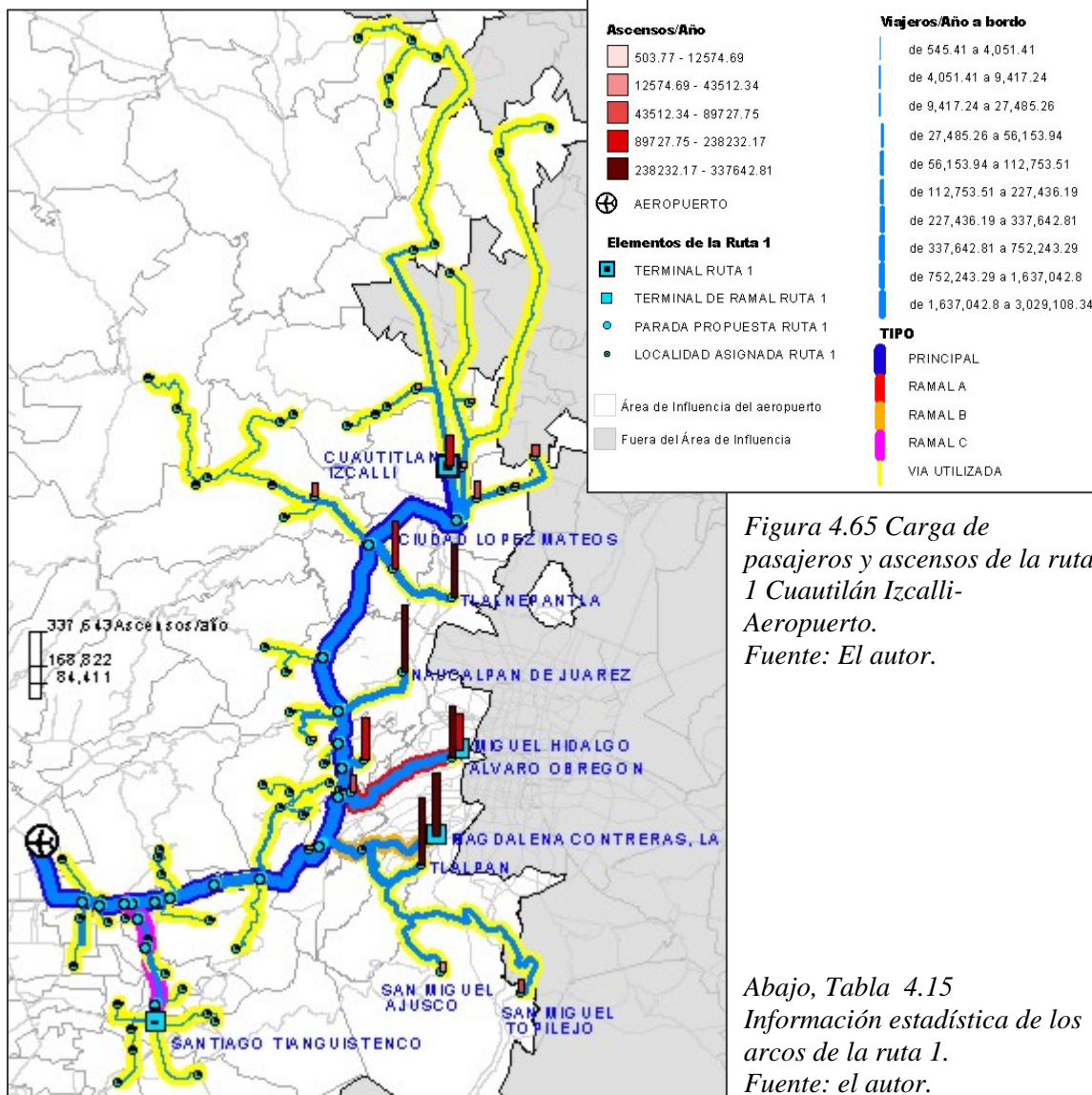


Figura 4.65 Carga de pasajeros y ascensos de la ruta 1 Cuautlán Izcalli- Aeropuerto.

Fuente: El autor.

Abajo, Tabla 4.15

Información estadística de los arcos de la ruta 1.

Fuente: el autor.

ID	DE	A	DISTANCIA KM	VEL COMERCIAL	TIEMPO (MIN)	TIEMPO DE PARADA	TIEMPO TOTAL	ACUMULADO	ASCENSOS	A BORDO
1	C. IZCALLI	PP01R1	5.113	40	7.67	2	9.67	9.67	201,390.30	201,390.30
2	PP01R1	PP02R1	10.586	40	15.88	2	17.88	27.55	227,436.19	428,826.49
3	PP02R1	PP03R1	11.857	40	17.79	2	19.79	47.33	626,157.75	1,054,984.24
4	PP03R1	PP04R1	5.558	40	8.34	2	10.34	57.67	4,989.46	1,059,973.70
5	PP04R1	PP05R1	3.234	40	4.85	2	6.85	64.52	353,317.76	1,413,291.46
6	PP05R1	PP06R1	2.42	40	3.63	2	5.63	70.15	1,235.82	1,414,527.28
7	PP06R1	PP07R1	2.812	40	4.22	2	6.22	76.37	222,515.52	1,637,042.80
8	PP07R1	PP08R1	4.873	40	7.31	2	9.31	85.68	529,915.66	2,166,958.46
9	PP08R1	PP09R1	0.207	70	0.18	2	2.18	87.86	17,516.37	2,184,474.83
10	PP09R1	PP10R1	8.231	70	7.06	2	9.06	96.91	752,243.29	2,936,718.12
11	PP10R1	PP11R1	4.491	70	3.85	2	5.85	102.76	11,630.34	2,948,348.46
12	PP11R1	PP12R1	4.301	70	3.69	2	5.69	108.45	1,262.81	2,949,611.27
13	PP12R1	PP13R1	1.58	70	1.35	2	3.35	111.80	6,251.76	2,955,863.03
14	PP13R1	PP14R1	1.993	70	1.71	2	3.71	115.51	1,127.73	2,956,990.76
16	PP14R1	PP15R1	2.417	70	2.07	2	4.07	119.58	45,324.99	3,002,315.75
17	PP15R1	PP16R1	1.611	70	1.38	2	3.38	122.96	3,851.85	3,006,167.60
18	PP16R1	AEROPUERTO	8.058	70	6.91	2	8.91	131.87	22,940.74	3,029,108.34
		TOTAL	79.342		97.87	34	131.87			

La tabla anterior (4.15) presenta el análisis del troncal de la ruta 1. El análisis de esta información permite identificar las vialidades que presentan mayor carga de usuarios, su aporte al total de la ruta, tiempos y distancias de desplazamiento que permitan al dimensionamiento y obtención de costos del servicio. La descripción de los campos de esta tabla es:

ID	Identificador único del segmento.
DE	Nodo de inicio del segmento.
A	Nodo final del segmento.
DISTANCIA (KM)	Longitud del segmento.
VEL COMERCIAL	Velocidad comercial en ese segmento
TIEMPO (MIN)	Impedancia del segmento.
TIEMPO DE PARADA	Tiempo de ascenso de pasaje en ese nodo.
TIEMPO TOTAL	Impedancia del segmento + tiempo de ascenso.
ACUMULADO	Tiempo total acumulado según el recorrido de la ruta.
ASCENSOS	Número de ascensos en la parada.
A BORDO	Número de personas a bordo en ese segmento de la ruta.

Para mayor referencia de la tabla 4.15, la siguiente figura (4.66) muestra los identificadores de paradas.

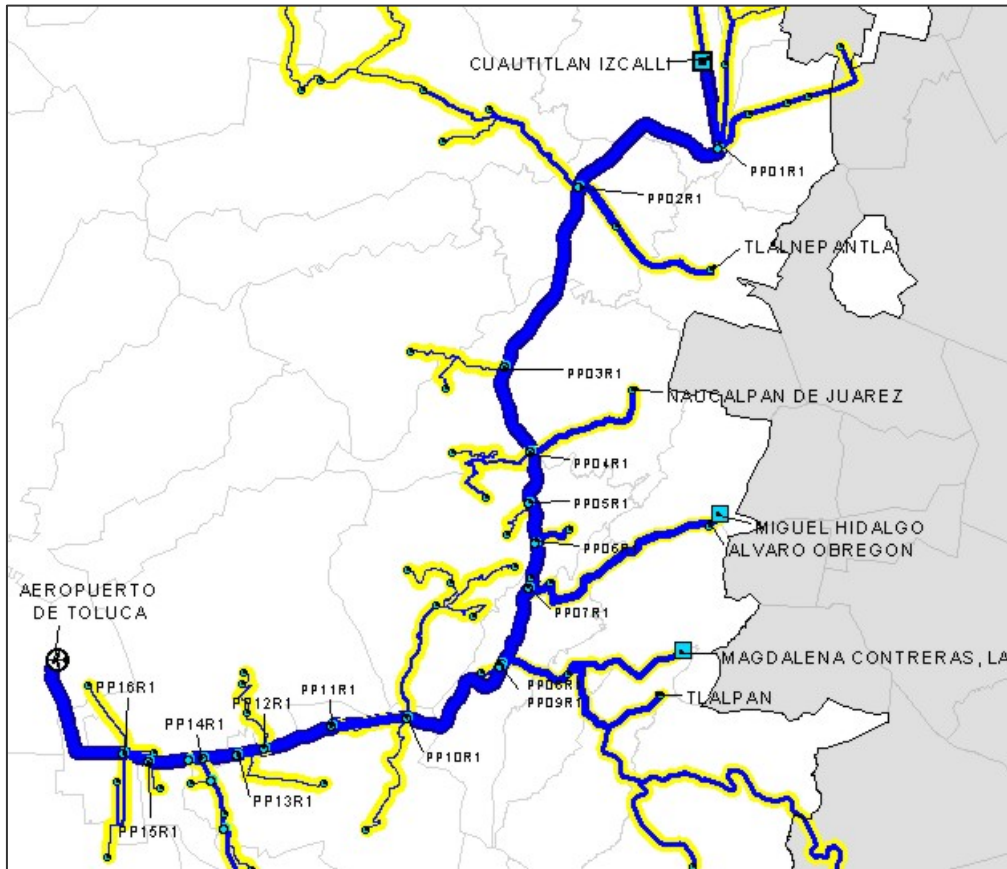


Figura 4.66 Localización de las paradas propuestas para el recorrido de la ruta 1.

Fuente: El autor.

Análisis de grafos similares se hicieron a las demás rutas y ramales. Hasta aquí se considera que el objetivo central de este capítulo ha sido cumplido pues se ha demostrado la utilidad del modelo gravitacional de interacción para el diseño de rutas de transporte.

CONCLUSIONES

Al concluir el proyecto de investigación que inicié como tesis, considero que el resultado contiene tanto aportaciones teóricas como prácticas, entre las cuales pueden señalarse las siguientes:

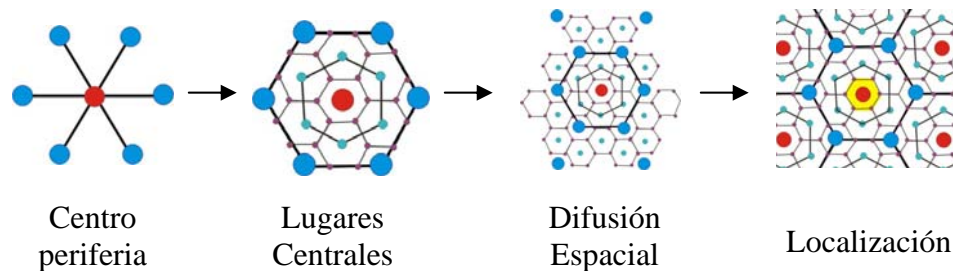
Entre las contribuciones académicas podemos mencionar en primer lugar, la revisión exhaustiva realizada sobre las diversas aplicaciones de los modelos de interacción utilizando sistemas de información geográfica. En particular, en la tesis se analizaron las distintas formas en que han utilizado y siguen aplicando el modelo gravitacional en múltiples disciplinas, desde la economía espacial o geoeconomía (para el análisis de movimientos migratorios, predicción del comportamiento territorial de consumidores, delimitación de áreas de mercado, localización de lugares de ventas y de servicios, análisis del desempeño de mercados y pronóstico de ventas) hasta su uso en el sector transporte, por ejemplo: pronóstico de la demanda, cálculo de interacción entre viajeros, identificación de jerarquía de nodos y arcos, selección de rutas óptimas, entre muchos otros aspectos.

Se encontró que la información referente al tema tratado en la mayoría de los casos estaba en estado disperso y fragmentado, por lo que su estructuración temática implicó un esfuerzo no sólo temporal sino conceptual. Es importante señalar que por tratarse de un tópico de vanguardia, las fuentes que utilizan los modelos de transporte con tecnología SIG aún se encuentran en proceso de maduración y temprana difusión. Durante la investigación se contabilizó que más del 95% de las referencias y aplicaciones que tratan estos temas, *no son investigaciones hechas en nuestro país*. En consecuencia, es posible considerar que los resultados de la tesis constituyen un trabajo original, con amplia información documental y gráfica (tablas, mapas, esquemas elaboradas principalmente por el autor) y un buen sustento metodológico (sistematización de los pasos a seguir para la comprensión y aplicación de los modelos utilizados) que se detalló y que puede seguirse trabajando hasta conformar una publicación con fines didácticos de nivel universitario.

Durante el desarrollo del capítulo 1, encontré que los conceptos utilizados en las teorías de análisis espacial son empleados intrínsecamente por la teoría de sistemas, en particular aquellos encaminados a la toma de decisiones en el transporte. Considero que este hallazgo es importante porque el enfoque espacial enriquece las aplicaciones en ingeniería orientadas a la planeación de los transportes. Si se considera que la solución del transporte es un problema complejo que requiere del análisis multicriterio, es importante que los ingenieros de transporte conozcan, vinculen y apliquen la teoría matemática con la territorial. Puede afirmarse que:

- Las teorías del análisis espacial son necesarias para entender y desarrollar el modelo gravitacional de interacción, que es el tema central de la tesis.
- Este conjunto de conocimiento me permitió adentrar en aplicaciones de modelos de transporte utilizando sistemas de información geográfica.
- El marco teórico existente (bibliografía, artículos, datos en internet, manuales de software, etcétera) referente a la aplicación de métodos de análisis espacial en el transporte es amplísimo, difuso y en cierta manera confuso; su

conocimiento exige trabajos de mayor profundidad para obtener el mayor beneficio posible. La organización y orden de las teorías relacionadas con el tema central de la tesis en el primer capítulo, es a mi punto de vista, el óptimo para el desarrollo de aplicaciones en transporte pues encausa el propósito de manera gradual y secuencial como se resume en la siguiente figura.



*Figura 5.1 Representación conceptual de la evolución de las teorías de análisis espacial.
Fuente: basado en información contenida en <http://hypergeo.free.fr/>.*

Por supuesto, la elección de un modelo de transporte está en función no sólo del problema a resolver y su eficacia teórica, sino también de restricciones tales como el tiempo, presupuesto disponible (recursos humanos, económicos, hardware, software, etcétera) y experiencias obtenidas en estudios similares. Las características de la información revisada y seleccionada nos permitieron definir el proceso metodológico en función de los datos necesarios para plantear cada model. En situación de escasez de recursos, utilizar técnicas como la asignación de impedancias en los arcos de una red mediante velocidades de diseño, o la percepción basada en la experiencia del observador puede ser eficaz, por supuesto, el investigador debe estar consciente del sesgo que puede generarse al utilizar indiscriminadamente tal o cual método.

Los siguientes puntos destacan aspectos importantes encontrados en el desarrollo del capítulo 2 y 3.

- La calidad y tipo de información es fundamental. Tanto las variables de masa como la impedancia, necesitan corresponder al fenómeno de interacción que se estudia. En el ejemplo del modelo de potenciales (capítulo 2 página 61 et seq.), para modelar se utilizó la población total y la distancia euclidiana de separación. En otro análisis más detallado se puede requerir que las masas sean el número de usuarios que cubran un perfil específico, el volumen de importaciones-exportaciones, volumen de ventas o de producción, etcétera. De igual forma, la impedancia puede ser el tiempo de conducción sobre la red vial, el costo del combustible o la longitud de separación entre muchos otros.
- Cuando se trabaja con bases de datos socioeconómicas (como las del INEGI), muchas veces es necesario aplicar filtros y cruces a las variables para obtener las masas requeridas por los modelos de interacción espacial. De igual forma, las bases de datos geométricos que corresponden a la localización de los elementos puntuales y la red de comunicación, necesitan trabajarse en un sistema de información geográfica para obtener los valores de las impedancias. Otras veces, es posible que la información no sea accesible o no

exista y por ello sea necesario generarla mediante trabajo de investigación, diseño y realización de encuestas socioeconómicas, georreferenciación y digitalización de información cartográfica.

- Se concluye también que los modelos de potencial de interacción son los antecesores de los modelos gravitacionales. En la siguiente figura se muestra la relación para las tres clases de modelos espaciales analizados en este trabajo. Estos modelos tienen complejidad creciente pues cada uno toma elementos del anterior. Esto se muestra en la siguiente figura.

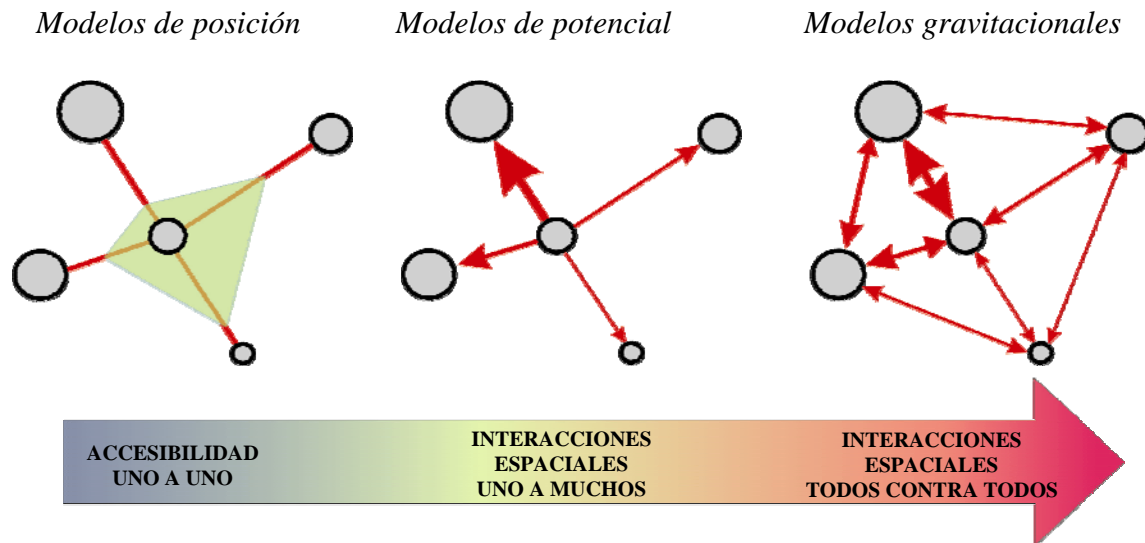


Figura 5.2 Representación conceptual de los ancestros del modelo gravitacional.

Fuente: elaboración propia.

A pesar de que los oponentes del modelo gravitacional explican que no puede ser confirmado científicamente y que se basa únicamente en la observación, el modelo tiene bases lógicas y matemáticas muy robustas -como se ha demostrado a lo largo de esta investigación- por su valor, se sigue utilizando en diversas disciplinas y se sigue fortaleciendo mediante diversas técnicas tratadas en el capítulo 3.

Un análisis de los resultados de este capítulo indica tres aspectos significativos:

1. Para cuantificar la separación espacial entre zonas, la mejor medida parece ser el tiempo de recorrido terrestre entre zonas. Para mejorar las estimaciones, es posible añadir la medida de los tiempos terminales en las zonas al final de cada viaje.
2. Respecto a las mejoras del modelo gravitacional se identifica que no existen intentos efectivos de generalización pues se debe contemplar una situación de investigación concreta y adaptar el modelo a la información disponible en cada caso. Pueden existir muchos modos de transformar el modelo gravitacional con el fin de crear un instrumento adecuado para los estudios empíricos.
3. Durante la investigación se encuentra que otros métodos como el de los factores de crecimiento son poco utilizados para medir la interacción, probablemente la razón se debe, a que es necesario aplicar factores de expansión muy altos en aquellas zonas

en las que se prevé un desarrollo importante, lo que implica que cualquier error en la recogida de datos se multiplica en el proceso de proyección. Otro inconveniente de estos métodos es que suponen que la resistencia al viaje permanece constante. La construcción de una nueva facilidad de transporte puede cambiar radicalmente el esquema de viajes, pero este tipo de cambios no puede ser introducido con estos métodos.

Aspecto tecnológico

Actualmente el modelo gravitacional experimenta un “renacimiento” con el uso de los SIG comerciales. La base conceptual del modelo es lógica para la mayoría de los usuarios y los requerimientos operativos no son complicados.

En la tesis se presentan de manera detallada los pasos metodológicos que seguimos para implementar nuestro modelo de interacción espacial, aplicado al sector transporte, mismo que puede replicarse y que deja abierta la posibilidad de calibrarse de distintas maneras, dependiendo de la información de que se disponga y de los objetivos planteados. Dicho de otra manera, se puede trabajar el modelo gravitacional sin ajustarse necesariamente a los algoritmos específicos que vienen en el software comercial. Un resumen de la metodología propuesta en este trabajo es:

1. Delimitación del área de estudio mediante algoritmos de análisis espacial incorporando las nociones de competencia espacial y optimización de recursos.
2. Determinación de las variables que influyen en la interacción espacial de un problema de transporte.
3. Aplicación de un modelo para determinar la interacción entre unidades territoriales con el fin de desarrollar rutas de transporte público a un servicio.
4. Uso de distintos procedimientos encaminados a la representación y análisis de los resultados.
5. Integración de todo lo anterior con bases teóricas fundamentadas en los trabajos de diversos investigadores.

El valor y originalidad de esta metodología es que aborda un problema complejo de la ingeniería del transporte utilizando una perspectiva territorial, con el apoyo tecnológico de los Sistemas de Información Geográfica. El modelo gravitacional de interacción aplicado de esta forma, permite estimar la probabilidad de que un consumidor decida utilizar un servicio en particular, considerando características generales derivadas de su ubicación y dada la presencia de otras alternativas.

La contribución fundamental es demostrar que este tema tiene gran campo de investigación y aplicación inmediata en la toma de decisiones que implica el transporte. Respecto de los resultados alcanzados en el estudio de caso, es importante señalar lo siguiente:

- La aplicación del modelo se desarrolló como parte del estudio realizado en al UNAM, para descentralizar los servicios de pasajeros que realiza actualmente el AICM.

- Como resultado del estudio se logró delimitar con base en el concepto de área de servicio, el área de influencia de cada aeropuerto a escala municipal (considerando el Centroide y la isócrona de cada municipio) así como criterios de desempate definidos en función de la política de descentralización de servicios de pasaje aéreo (capítulo 4, figura 4.14, página 136).
- Se definió el perfil de usuarios actuales y potenciales de los servicios aéreos de la región centro y se estimó la demanda total. Este factor cobró gran valor a partir del momento en que se identificó a nivel AGEB su ubicación, tanto a escala regional como metropolitana.
- En función del conocimiento territorial de la demanda, se aplicó el modelo gravitacional de interacción para identificar las rutas de transporte que la satisficieran con un servicio óptimo.
- Con base en los resultados del estudio se aplicaron diversas acciones en el aeropuerto de Toluca, donde actualmente la demanda ha rebasado considerablemente las expectativas que la SCT tenía al inicio del estudio.
- Lo anterior demuestra la utilidad de este tipo de análisis y la contribución que puede hacer la ingeniería de transportes con apoyo del conocimiento territorial y de la tecnología SIG.

Alcances

Puesto que los modelos son abstracciones de la realidad, ningún modelo matemático puede reflejar en su totalidad el complejo comportamiento humano. Es por esta razón que existe un margen de error con el que inevitablemente se trabaja, sin embargo puede -y debe- ser corregido con otros métodos que evalúen la realidad directamente. Técnicas como el método de encuesta son buen complemento al uso de los modelos. Apunto 5 importantes líneas de investigación que se encuentran abiertas de cara al futuro:

1.- Profundizar en la vinculación de la teoría de Localización con los Lugares Centrales.

Propongo utilizar ambos enfoques en los procesos de agrupación de consumidores y servicios estudiando las implicaciones de la competencia sobre el espacio. Una línea de investigación fructífera debería estudiar el efecto que los desplazamientos de los consumidores tienen en el fenómeno de la agrupación de los servicios.

En la siguiente tabla resumen expongo una síntesis con lo más relevante sobre los principales exponentes de la teoría clásica de localización con el fin de hacer una guía de referencia para futuras extensiones de la investigación.

Continúa en la página siguiente...

<p>USO DE SUELO <i>Von Thünen</i> <i>Alonso William</i></p>	<p>LOCALIZACIÓN INDUSTRIAL ORIENTADA A LA PRODUCCIÓN <i>Weber/Smith/Isard</i></p>	<p>LUGARES CENTRALES ÁREAS DE MERCADO <i>Christaller/Lösch</i></p>	<p>COMPETENCIA ESPACIAL <i>Hotelling</i></p>
--	--	---	---

<p>Objetivos</p>	<p>Thünen: Uso óptimo para la agricultura basado en los costos de transporte al mercado</p> <p>William, A.: Distancias óptimas entre los usos de suelo residenciales y el distrito de negocios.</p>	<p>Weber: El costo de transporte minimiza la localización.</p> <p>Smith: Maximización de beneficios.</p> <p>Isard: Combinación óptima de entradas con el nivel óptimo de producción en una localización óptima.</p>	<p>Áreas de mercado óptimas.</p>	<p>Respuesta óptima en la localización competitiva.</p>
<p>Suposiciones</p>	<p>Thünen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mercado central con precios dados. • Métodos de producción dados. • Tecnología uniforme. • No existen economías de escala. • Funciones lineales de distancia/costo del transporte. <p>Alonso: Ciudad monocéntrica</p>	<p>Weber:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Función de producción dada (no hay sustituciones y no existen economías de escala). • Los precios en el mercado están dados. 	<p>Christaller:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Distribución especial uniforme de la vivienda. • Funciones homogéneas de demanda. • Los costos de transporte pueden ser asignados a bienes individuales. (p.ej. no existen viajes con múltiples funciones). 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribución espacial uniforme de la demanda (precio y distancia inelásticos). • Un sólo competidor. • Los costos de producción son independientes de la localización.
<p>Oferta Demanda</p>	<p>Dispersa Localizada</p>	<p>Localizada Localizada</p>	<p>Localizada Dispersa</p>	<p>Localizada Dispersa</p>
<p>Herramientas analíticas principales</p>	<p>Thünen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Funciones de renta • Margen de cultivo <p>William A.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Función del precio de la oferta 	<p>Weber:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Índice de materiales. • Isodápanas. <p>Smith:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Curvas de costo del espacio (perfiles de isodápanas). • Márgenes espaciales del beneficio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Principios jerárquicos. • Concepto de Umbral y de Alcance (punto de ruptura espacial). • Curva de demanda espacial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Matriz de rentabilidad.

Tabla 5.1 Síntesis de las principales teorías de localización clásicas. Fuente: el autor

2.- *Desarrollo de mejores medidas para cuantificar las variables del modelo.*

Como por ejemplo, en el caso de la distancia o separación espacial, puede hacerse a partir de la percepción topológica, psicológica o morfológica, o mediante el desarrollo de un índice que integre estos factores. Este análisis contribuiría al mejor conocimiento del modo cómo los consumidores de los servicios las agregan en su proceso de decisión.

3.- *Incorporación de nuevas variables a los modelos y una definición más realista de las ya existentes.*

Se podrían determinar en forma más precisa, los tiempos de recorrido de los diferentes tramos de carretera introduciendo variables que lo afecten como: intensidad del tráfico de vehículos, volumen de vehículos pesados, estado de conservación, ancho de carriles, semaforización, etc. Los núcleos de población que se encuentran de paso durante las travesías también suponen una resistencia al movimiento de vehículos y por tanto se podría asignar una impedancia a estos nodos en el SIG. Otro ejemplo es que a los núcleos de población se les podrían asignar otras características como: población activa por sectores económicos, población por edades, infraestructura que posee, número de establecimientos de tal servicio o sector, cambios demográficos, etc.

Los paquetes de SIG disponibles usualmente hacen análisis uno a uno o todos a todos, de los que se derivan rutas subsecuentes utilizando algoritmos de elección de rutas. La mayoría de las investigaciones publicadas sobre este tema, tratan de redes con ajuste en topología y costos. El cálculo de las rutas óptimas resulta de gran interés para la implementación de modelos gravitacionales realistas y es un área de investigación muy amplia en la que valdría la pena profundizar.

4.- *Simulación espacial de escenarios y procesos de difusión.*

En general, los primeros modelos de transporte espaciales utilizando SIG fueron aplicados al campo regional, como es el caso de los movimientos migratorios, urbanos, flujos de trabajo, etc. Actualmente los estudios de transporte de vanguardia incorporan la simulación de escenarios a escala urbana considerando variaciones en los factores que integran los modelos.

Utilizando un SIG como herramienta se puede determinar el efecto que ciertas alteraciones en la red carretera producirían sobre la accesibilidad de una zona determinada, así se podría simular:

- La mejora en un tramo de carretera aumentando la velocidad de desplazamiento específica de ese tramo.
- El efecto que produciría la construcción de una nueva carretera mediante la creación de una nueva entidad gráfica a la que se le asignaría los atributos correspondientes.
- Un corte en una carretera o la construcción de un embalse y su efecto sobre la accesibilidad.
- El efecto que produciría sobre la accesibilidad del territorio la creación de una infraestructura ferroviaria de velocidad media o alta con el fin de determinar la óptima.

El estudio de la simulación espacial implica profundizar en la Teoría de la Difusión y sus aplicaciones en la determinación y evolución de las áreas de mercado, tanto en el espacio como en el tiempo además de incorporar esta metodología al proceso de análisis multicriterio para la elección de alternativas.

5.- *Profundizar en los métodos de clasificación estadística de los resultados para su representación.*

La representación de la información implica interpretación del fenómeno y conocimiento de los métodos estadísticos por parte del investigador. Concretamente en el estudio de caso presentado en el capítulo 4, el uso de un método de clasificación estadístico no incluido en los SIG convencionales incrementó la capacidad para reconocer patrones de interacción con lo que se obtuvieron elementos para el diseño de rutas de transporte. Es necesaria una línea de investigación que justifique e integre los métodos de representación cartográfica con los métodos estadísticos de clasificación de la información.

6.- *Vincular el método de jerarquía de arcos óptimos con el tránsito promedio diario anual y el concepto de morfología de las redes de transporte.*

El resultado del método es una matriz ponderada por la frecuencia de uso de los arcos con menor costo que conectan todos los nodos de un sistema. Vincular este método con los arcos que tienen medición directa de volumen de tránsito podría permitir identificar estructuras en la red de transporte (dendrítica, polar, reticular, árbol, etcétera). Este análisis sería de gran ayuda para identificar zonas con alta y baja accesibilidad a la red e identificar la lógica espacial en el proceso de su formación.

BIBLIOGRAFÍA

A

- Albadalejo, P. (1995): *Cinco Líneas Metodológicas para la delimitación de áreas de mercado*. Revista “Estudios de Economía Aplicada”, Asepelt España, nº 4, Diciembre 1995, pp. 5-27.
- Albertson, M. O. y Hutchinson, J. (1988): *Discrete Mathematics with Algorithms*. John Wiley and Sons.
- Alonso, W. (1964): *Location and Land Use*. Cambridge, mass., Harvard University Press.
- Amin S. (1973): *Le développement inégal*. Editions de Minuit. Forum du Tiers Monde (FTM); FMA: Foro Mundial de Alternativas.
- Appel, K. y Haken, W. (1977): *Every planar map is four colourable*, Part I: discharging y Part II: reducibility. En: Illinois Journal of Maths 21, 429-567.
- Applebaum W. y S.B. Cohen (1961): *The Dynamics of Store Trading Areas and Market Equilibrium*. Annals of the Association of the American Geographer, 51; pp. 73-101.

B

- Batty, M. (1978): *Reilly's Challenge: New Laws of Retail Gravitation which Define Systems of Central Places*. Environment and Planning, nº 10, pp.185-219
- Bellman, R. E. (1958): *On a routing problem, quarterly of Applied Mathematics*.
- Bernd A. Berg, (2004): *Markov Chain Monte Carlo Simulations and Their Statistical Analysis*. World Scientific.
- Biggs, N. L. (1994): *Matemática discreta*. Ed. Vicens Vives.
- Black, W. R. (2003): *Transportation: A Geographical Analysis*. Guilford Press
- Black, W. R. (1973): *An Analysis of Gravity Model Distance Exponents*. *Transportation: An International Planning Journal*, 2, pp. 299-312.
- Black, W. R., Larson R. C. (1972): *A Comparative Evaluation of Alternate Friction Factors in the Gravity Model*. The Professional Geographer, 24, No. 4, pp. 335-337.
- Black, W. R. (1971): *The Utility of the Gravity Model and Estimates of Its Parameters in Commodity Flow Studies*. Proceedings of the Association of American Geographers, 3, pp. 28-32.
- Boukharine N. (1967): *L'économie mondiale et l'impérialisme*. Paris.

C

- Carey, H. C. (1858): *Principles of Social Science*. Ed. Trubner. E. U.
- Carroll, J. D. (1955): *Spatial Interactions and the urban-metropolitan description*. Traffic Quarterly, pp. 149-161.
- Cavanaugh, J. A. (1950): *Formulation, Analysis and test of the interactance hypothesis*. American Sociological Review, pp. 763-781.
- Converse, P.D. (1949): *New Laws of Retail Gravitation*. Journal of Marketing, 14, pp. 94-102.
- Cormen, Leiserson, Rivest y Stein (2001): *Introduction to Algorithms*. Segunda Edición, MIT Press and McGraw-Hill.

- Constantine B., Bouchard R. y Clyde E. (1964): *An Evaluation of Simplified Procedures for Determining Travel Patterns in a Small Urban Area*. Presentado en la 43 conferencia anual del Highway Research Board.

CH

- Chartrand, G. y Oellerman, O. (1993): *Applied and algorithmic graph theory*. McGraw-Hill.
- Chasco, M.C. y García G. (1997): *Modelos de determinación de áreas de mercado del comercio al por menor*. Instituto L.R. Klein. Departamento de Economía Aplicada. Facultad de CC.EE. y EE. de la Universidad Autónoma de Madrid. Departamento de Comercialización e Investigación de Mercados. Centro de Estudios Superiores Sociales y Jurídicos Ramón Carande de la Universidad Complutense de Madrid.
- Cheriton y Tarjan (1976): *Finding minimum spanning trees*. En: SIAM Journal of Computing, 5, pp. 724–741.
- Cherkassky, B., Goldberg, A. and Radzik, T. (1993): *Shortest paths algorithms: theory and experimental evaluation*. Technical Report 93-1480, Department of Computer Science, Stanford University.
- Chojnicki, Z. (1966): *Zastosowanie modeli grawitacji i potencjalu w badaniach przestrzenno-ekonomicznych*. (La aplicación de los modelos gravitacionales y de potenciales en estudios especial-económicos). Studia KPZK PAN, no. 14.
- Christaller, Walter (1935): *Central Places in Southern Germany* (Die Zentralen Orte in Sudlentschland), traducido de Die Zentralen Orte in Süddeutschland por Carlisle W. Baskin, Prentice-Hall (1966).

D

- Deo, N. and Pang, C.-Y. (1984): *Shortest path algorithms: taxonomy and annotation*. Networks, vol. 14, pp. 275-323.
- Dijkstra, E. (1959): *A note on two problems in connexion with graphs*. En: Numerische Mathematik 1, 269-271.
- Dodd, S. C. (1950): *The interactance hypothesis: A gravity model fitting physical masses and human groups*. American Sociological Review, pp. 245-256.
- Domansky, R. (1977): *Geografia ekonomiczna* (Geografía económica). PWN, Varsovia.
- Douglas, E. (1949): *Measuring the General Retail Area*. Journal of Marketing, 13, pp.481-497.

E

- ESRI Press (1995): *Understanding GIS: The Arc Info Method*.
- Euler L. (1736): *Solutio Problematis ad Geometriam Situs Pertinentes* (Solución de un problema referente a la geometría de la posición).

F

- Ford, L. R. y Fulkerson, D. R. (1962): *Flows in Networks*. Princeton University Press.

- FOTHERINGHAM, A.S. y M.E. O'KELLY (1989): *Spatial Interaction Models: Formulations and Applications*. Kluwer Academic Publishers. Studies in Operational Regional Science.

G

- Garrocho C., Chávez T. y Álvarez J.A. (2003): *La dimensión espacial de la competencia comercial*. El colegio Mexiquense, México. Economía, sociedad y territorio, Vol. IV, núm. 14.
- Grimaldi, R. P. (1997): *Matemática discreta y combinatoria*. Addison-Wesley Iberoamericana.

H

- Hägerstrand, T. (1953): *Innovation Diffusion as a Spatial Process*, traducción (1967), Chicago University Press.
- Hagget, P., Cliff, A.D. y Frey A.E. (1977): *Locational analysis in Human Geography*. Segunda edición. Edición revisada y extendida con ocho nuevos capítulos. Londres. [Publicada también en dos volúmenes; Volumen I: "Locational Models" (298 páginas) y Volumen II: "Locational Methods" (346 páginas).] http://www.ggy.bris.ac.uk/staff/personal/PeterHaggett/haggett_publications.html
- Hansen, W.G. (1959): *Accessibility and Residential Growth*. Tesis no publicada de Maestría, Massachusetts Institute of Technology.
- Hansen, W.G. (1962): *Evaluation of Gravity Model Trip Distribution Procedures*. Highway Research board Bulletin 347, pp. 67-76.
- Harstfield, N. y Ringel, G. (1990): *Pearls in graph theory*. Academic Press.
- McHugh, J. A. (1990): *Algorithmic Graph Theory*. Prentice Hall.
- Heanue K. E., Hamner L. y Hall R.M. (1964): *The adequacy of clustered home interview sampling for calibrating a gravity model trip distribution formula*. Highway research board.
- Helvig, M. (1964): *Chicago's external truck movements*. Chicago [Departamento de Geografía, Universidad de Chicago]. Artículo de investigación no. 90.
- Hendriks, P.H.J., (1998): *Information Strategies for Geographical Information Systems*. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 12, No. 6: pp. 621-639.
- Hotelling H. (1929): *Stability in Competition*.
- Huff, D.L., 2005. *The Use of Geographic Information Systems and Spatial Models in Market Area Analysis*. ESRI GeoInfo Summit, April 18-19, Chicago.
- Huff D.L. (2004): *A Note on the Misuse of the Huff Model in GIS*. Retrieved from www.mpsisys.com on January 16, 2004.
- Huff, D.L. (2003): *Parameter Estimation in the Huff Model*. ArcUser, October-December, 34-36.
- Huff, D. L. (1964): *Defining and estimating a trading area*. Journal of Marketing, 28:34-38.
- Huff, D.L. (1963): *A Probabilistic Analysis of Consumer Spatial Behavior*. William S. Decker (de.), *Emerging Concepts in Marketing*, Chicago: American Marketing Association, pp. 443-461.

- Huff, D.L., (1963): *A Probabilistic Analysis of Shopping Center Trade Areas*. Land Economics 39: 81-90

I

- Isard, W. (1956): *Location and Space-Economy*. MIT Press. Cambridge.
- ISARD, W. (1971): *Métodos de Análisis Regional. Una introducción a la ciencia regional*. España: Ediciones Ariel. 1971. p 815 p.

J

- Jones, K.G. y D.R. Mock (1984): *Evaluating Retail Trading Performances. Store Location and Store Assessment Research*. R.L. Davies y D.S. Rogers. John Wiley. N. York.

K

- Kruskal, J. B. (1956): *On the shortest spanning subtree and the traveling salesman problem*. En: Proceedings of the American Mathematical Society. 7, pp. 48–50.

L

- Lantada, Nieves y Núñez Amparo (2004): *Sistemas de Información Geográfica prácticas con ArcView*. Alfaomega, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Lefschetz, Solomon (1942): *Algebraic Topology*.
- Lösch, August (1954): *The Economics of Location*, Yale Univ. Press, traducido por William H. Woglom con la asistencia de Wolfgang F. Stolper de Die raumliche Ordnung der Wirtschaft, 2a edición (1944).
- Luxemburg R. (1951): *The Accumulation of Capital*, London.

LL

- Lloyd, P. E. y Dicken, P. (1977): *Location in space. A theoretical approachs to economic geography*, Londres, Harper & Rox, Publisher.

M

- Mackay, J. R. (1958): *The interactance hypothesis and boundaries in Canada*. The Canadian Geographer, no. 2, pp. 1-8.
- Mandelbrot B. (1975): *Les objets fractales: Forme, hasard et dimension*. Flammarion.

N

- Newton, I. (1687): *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Ed. T. T. et J. Tegg.
- New York state department of public works, subdivision of transportation planning and programming (1962): *External survey manual, Niagara frontier transportation study manual; Truck and taxi survey manual*. Niagara frontier transportation study manual.

O

- O'Sullivan, Patrick M. (1970): *Variations in Distance Friction in Great Britain*. Area, No. 2; pp. 36-39.
- O'Sullivan, Patrick M.; Byler J. (1974): *The Forecasting Ability and Temporal Stability of the Coefficients of Gravity Models Applied to Truck Traffic*. Traffic Engineering and Control, Vol. 15, pp. 474-476.

P

- Potrykowski, M; Taylor, Z. (1982): *Geografía del transporte*. Ariel. Barcelona.
- Prim, R. C. (1957): *Shortest connection networks and some generalisations*. En: Bell System Technical Journal, 36, pp. 1389–1401.

R

- Ravenstein E.G. (1885): *The Laws of Migration*. Journal of the Royal Statistical Society, No. 48, 1885, pp.167-235, y No. 52, 1889, pp. 241-305.
- Reilly, W. J. (1929): *Methods for the study of retail relationships*. University of Texas. Bulletin, 2944.
- Reilly (1931): *The Law of the Retail Gravitation*, Nueva York, USA.
- Reilly, W. J. (1953): *The Law of Retail Gravitation*. En Fillsburg Publishers, New York.
- Reynaud A. (1981): *Société, espace et justice Inégalités régionales et justice socio-spatiale*.
- Rust, R.T. y N. Donthu (1995): *Capturing Geographically Localized Misspecification Error in Retail Store Choice Models*. Journal of Marketing Research, vol. XXXII (febrero, 1995); pp. 103-110.

S

- Shaw, S. L., Miller H. J. (2002): *Geographic Information Systems for Transportation Principles and Applications*. Oxford University Press.
- Stanford Research Institute (1962): a) *Projection of Population, Employment and trip desires from home to work (for the San Mateo County Transportation Study)*. pp. 5-6. b) *Manual for the Gravity Model Computer Programs* (1962). Developed for the San Mateo county Traffic Ways Study, Project No. IE-36961.
- Stouffer S. (1940): *Intervening Opportunities: A Theory Relating Mobility and Distance*, American Sociological Review.

T

- Taaffe, E.J., Gauthier H.L. y O'Kelly M.E. (1995): *Geography of Transportation*. Second Edition, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, p. 223.
- Tanner, J.C. (1961): *Factor Affecting the mount of Travel*. Department of Scientific and Industrial Research, Road Research Technical Paper No. 51. Londres.
- Thiessen, A.H. y J.C. Alter (1911): *Precipitation Averages for Large Areas*. Monthly Weather Review 39; pp. 1082-1084.
- Thünen Johann Heinrich von (1826), *The Isolated State*.

U

- U.S. Department Of Transportation (1983): *Calibrating & Testing a Gravity Model for Any Size Urban Area*. Federal Highway Administration.
<http://ntl.bts.gov/DOCS/CAT.html>

V

- Voorhees, A.M. (1958): *Forecasting Peak Hours of Travel*. Highway Research Bulletin 203, pp. 37-46.
- Voorhees, A.M. y Morris R. (1959): *Estimating and forecasting Travel for Baltimore by use of a mathematical model*. Highway research board bulletin 224, pp. 105-114.
- VVAA (1988): *Trabajos prácticos de Geografía Humana*. Madrid. Ed. Síntesis. Págs. 299-303.

W

- Weber Alfred (1909): *Theory of the Location of Industries*, traducido por Carl J. Friedrich The University of Chicago Press (1929).
- Werner S. (1916): *Der moderne Kapitalismus. Historisch-systematische Darstellung des gesamteuropäischen Wirtschaftslebens von seinen Anfängen bis zur Gegenwart*. Edición final en 1916, repr. 1969.
- Whitmore, Richard E. (1965): *Distribution Formula in Several Specific Urban Areas*. Civil Engineering Department, Universidad de Tennessee.

Y

- Young, E. C. (1924): *The Movement of Farm Population*. Agricultural Experimental Station Bulletin 4269. New York.

Z

- Zhan, F. B. (1997): *Three fastest shortest path algorithms on real road networks: Data structures and procedures*. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, vol.1, no.1, pp. 69-82.
(http://publish.uwo.ca/~jmalczew/gida_1/Zhan/Zhan.htm).
- Zhan, F. B. and Noon, C. E. (1996): *Shortest Path Algorithms: An Evaluation using Real Road Transportation*. Science vol. 32, no. 1, pp. 65-73.
- Zipf, G. K. (1949): *Human Behavior and the Principle of Least Effort*. Addison-Wesley Press, Cambridge.

Otras referencias

Compañías de Sistemas de Información Geográfica

- Caliper Corporation
Transcad
<http://www.caliper.com/tcovu.htm>
- Environmental Studies Research Institute
www.esri.com
Business Analyst

http://www.esri.com/getting_started/business/business_analyst.html

<http://www.esri.com/software/bao/resources/geocoding.html>

Environmental Systems Research Institute (ESRI), España

<http://www.esri-es.com>

- Geography Network
www.geographynetwork.com
- Global Mapper
www.globalmapper.com/
- Google Earth
- IRIS, INEGI
www.inegi.gob.mx/geo/default.asp?c=697
- Leica Geosystems Geospatial Imaging
www.erdas.com
- MapInfo Corporation
www.mapinfo.com
Vertical Mapper
<http://extranet.mapinfo.com/products/Overview.cfm?productid=1739>
- Map Quest
www.mapquest.com
- PCI Geomatics
www.pcigeomatics.com
- Space Imaging
www.geoeye.com
- Tele Atlas
www.teleatlas.com/Pub/Home

Transporte

- American Society of Civil Engineers
<http://www.asce.org/asce.cfm>
- Geografía del Transporte
www.people.hofstra.edu/geotrans/index.html
- Huff, D.L. (2003, Octubre-Diciembre): Parameter estimation in the Huff model. ArcUser, 34-36. ESRI.
www.esri.com/news/arcuser/1003/files/huff.pdf
- Instituto Mexicano del Transporte
<http://www.imt.mx/siget/principal.htm>
- Servicios de Geocodificación en línea
http://www.mapflow.com/prods_AddressagentOnline.htm
<http://www.geocode.com/>
<http://www.esri.com/software/bao/resources/geocoding.html>
www.teleatlas.com/Pub/Products/Geocoding/index.htm
- Teoría de los lugares centrales:
http://en.wikipedia.org/wiki/Central_Place_Theory
- Teoría de la difusión espacial
<http://hypergeo.free.fr/>
- Teoría de localización
http://www.cmq.edu.mx/documentos/Revista/revista%2014/est14_1.pdf

- Teoría de grafos
http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_de_grafos
- Transportation Engineering. Online Lab Manual.
Ejemplo de aplicación del modelo gravitacional de distribución de viajes
http://www.webs1.uidaho.edu/niatt_labmanual/Chapters/traveldemandforecasting/exampleproblems/GravityModel.htm
- Métodos de asignación de rutas “todo o nada”
<http://www.husdal.com/mscgis/research.htm>
- National Transportation Library
<http://ntl.bts.gov/DOCS/CAT.html>
- Ley de la gravitación universal de Newton:
http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_la_gravitaci%C3%B3n_universal
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
<http://portal.sct.gob.mx/>

Publicaciones:

- www.geospatial-online.com
Geo Spatial Solutions
- www.geoplace.com
GeoWorld, Business Geographics, GeoWorld, GeoEurope, GeoAsiaPacific
- www.GISdevelopment.net
GIS Development
- www.esri.com/news/arcnews/arcnews.html
Arcnews
- www.gis.com
- www.giscafe.com
- www.gis.about.com
- www.geocomm.com
- www.spatialnews.com
- www.directionsmag.com

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1	Algunos tipos de interacciones espaciales.....	2
Figura 1.2	Representación vectorial de una interacción espacial.....	2
Figura 1.3	Relación oferta/demanda.....	3
Figura 1.4	Representación de la existencia de una oportunidad alternativa.....	3
Figura 1.5	Transferibilidad mediante transporte adecuado.....	4
Figura 1.6	Relación entre alcance y umbral.....	7
Figura 1.7	Conformación de áreas de mercado hexagonales según la lógica de la teoría de lugares centrales de Christaller.....	8
Figura 1.8	El sistema de lugares centrales de Lösch contemplando la distribución de la población según Isard.....	9
Figura 1.9	Curva logística del proceso de difusión.....	11
Figura 1.10	Conceptualización de la producción industrial clásica.....	15
Figura 1.11	Conceptualización de los costos totales de transporte para diferentes localizaciones de una fábrica.....	16
Figura 1.12	Isolíneas a cada kilómetro sobre una área homogénea a partir de los puntos A y B.....	16
Figura 1.13	Isolíneas que consideran el tiempo de recorrido sobre la red vial desde los puntos A y B.....	17
Figura 1.14	Patrón de isodápanas obtenidas en un área homogénea.....	17
Figura 1.15	Isócronas y área de servicio de 2 min. a partir del centro de la ciudad de Puebla.....	18
Figura 1.16	Isócronas raster hechas mediante un proceso de interpolación.....	19
Figura 1.17	Juego de isócronas para la ciudad de Puebla en formato raster.....	19
Figura 1.18	Juego de isócronas para la ciudad de Puebla en formato vectorial.....	20
Figura 1.19	Juego de isócronas para la ciudad de Cholula. Del lado izquierdo se tienen en formato raster y del derecho en vectorial.....	20
Figura 1.20	Mapa de isodápanas para el problema de ejemplo.....	21
Figura 1.21	Componentes de un SIG.....	23
Figura 1.22	Representación del mundo real mediante un modelo de datos vectorial en un SIG.....	24
Figura 1.23	Sistema de codificación vectorial utilizando el concepto de topología proveniente de la teoría de los grafos.....	26
Figura 1.24	Componentes principales de un Sistema de Información Geográfica.....	29
Figura 1.25	Complejidad de la modelación espacial de temas de transporte.....	30
Figura 1.26	Business Analyst para ArcGis 9.....	33
Figura 1.27	Mapa de probabilidades de interacción generado en un SIG comercial.....	34

CAPÍTULO 2

Figura 2.1	Mapa de isócronas con densidad de población.....	37
Figura 2.2	Efecto de la separación espacial sobre la probabilidad de interacción...	38
Figura 2.3	Relación de la distancia con las interacciones en un sistema.....	39

Figura 2.4	Gradiente del tránsito diario promedio anual (TDPA) en un sistema de localidades.....	40
Figura 2.5	Representación del problema de los siete puentes de Königsberg.....	40
Figura 2.6	Representación del problema de los cuatro colores.....	41
Figura 2.7	Representación de un grafo.....	41
Figura 2.8	Representación del isomorfismo de un grafo.....	42
Figura 2.9	Representación de los sentidos y bucles en un grafo.....	42
Figura 2.10	Representación de los nodos fuente y pozo.....	43
Figura 2.11	Grafo que conforma un árbol.....	43
Figura 2.12	Grafo con la relación de algunas actividades humanas.....	46
Figura 2.13	Representación por grafos de ciudades y carreteras con su respectiva valuación.....	47
Figura 2.18	Enfoque determinista para modelar las interacciones espaciales.....	48
Figura 2.19	Enfoque explicativo-estocástico para modelar las interacciones espaciales.....	49
Figura 2.20	Modelo de posición del punto de ruptura.....	50
Figura 2.21	Cálculo de puntos de ruptura múltiples.....	51
Figura 2.22	Diagrama conceptual del ejemplo propuesto. Punto de ruptura de Converse.....	51
Figura 2.23	Resultados obtenidos con el modelo de Converse.....	52
Figura 2.24	Problema propuesto para delimitar el área de influencia.....	53
Figura 2.25	Área de influencia según el modelo de Converse para el Distrito Federal frente a 8 de sus localidades conurbadas más importantes.....	55
Figura 2.26	Áreas urbanas de las localidades en estudio y área de influencia de mercado según el modelo de Converse para el Distrito Federal.....	56
Figura 2.27	Área de influencia del ejemplo anterior utilizando polígonos de Thiessen.....	57
Figura 2.28	Formulación general de los modelos de interacción.....	57
Figura 2.29	Representación de la complementariedad entre un par origen – destino.....	58
Figura 2.30	Formulación general del modelo de potencial.....	61
Figura 2.31	Modelación del potencial de interacción.....	62
Figura 2.32	Distribución de las probabilidades de viajar para los habitantes de la localidad i como resultado de la modelación del potencial de interacción.....	63

CAPÍTULO 3

Figura 3.1	Fórmula de la gravitación universal y esquema de la fuerza de gravedad entre dos masas M y m , separadas a una distancia r	64
Figura 3.2	Representación gráfica de la idea de Reilly sobre la interacción de las áreas de comercio entre localidades.....	65
Figura 3.3	Esquema simplificadorio de las variables utilizadas en el modelo de Reilly.....	66
Figura 3.4	Diagrama conceptual del modelo gravitacional elemental aplicado al transporte.....	67
Figura 3.5	Sistema de 3 localidades con sus respectivas vías de comunicación.....	78
Figura 3.6	Factores que intervienen en la cuantificación del tiempo de viaje.....	79

Figura 3.7	Tipos de problemas de rutas óptimas.....	80
Figura 3.8	Grafo que representa un sistema de ciudades comunicadas por la red vial.....	81
Figura 3.9	Izquierda: árbol de caminos con el tiempo de recorrido entre cada par o-d según las impedancias contenidas en la red vial (fondo). Abajo: tabla con la estructura de los datos en un SIG.....	81
Figura 3.10	Análisis de jerarquía de arcos al árbol de rutas óptimas.....	82
Figura 3.11	Contornos de isócronas en intervalos de 2 minutos de tiempo de conducción sobre la red vial a partir del nodo X.....	83
Figura 3.12	a) Representación por grafo de los viajes intrazonales para la zona 1. b) Subzonas contenidas en la zona 1 con sus respectivos centroides....	84
Figura 3.13.	Determinación de tiempos de viaje intrazonales.....	85
Figura 3.14	Esquema conceptual de algunas variables de interacción para utilizar el modelo gravitacional en un sistema con tres zonas.....	86
Figura 3.15	Representación matricial de las impedancias de un sistema espacial....	87
Figura 3.16	Total de interacciones entre la zona i y todas las zonas j.....	89
Figura 3.17	Pares origen-destino que interactúan en la figura 3.16.....	89
Figura 3.18	Representación del problema de la elección espacial en forma de grafo.....	92
Figura 3.19	Resultados del modelo de Huff mediante contornos de isoprobabilidades obtenidos mediante un proceso de interpolación....	92
Figura 3.20	A partir de valores muestrales dados, los métodos de interpolación espacial permiten obtener los valores intermedios.....	93
Figura 3.21	Control de los puntos en la interpolación.....	93
Figura 3.22	Diferencias en la interpolación al considerar o no barreras.....	94
Figura 3.23	Superficie interpolada mediante el método IDW.....	94
Figura 3.24	Superficie interpolada mediante el método Spline.....	95
Figura 3.25	Conceptualización del ejemplo. Se incluyen las masas y los valores de separación de todos los elementos.....	96
Figura 3.26	Jerarquía de la interacción del subsistema con origen en "i".....	98
Figura 3.27-I	Jerarquía de la interacción del subsistema con origen en "x".....	98
Figura 3.27-II	Jerarquía de la interacción del subsistema con origen en "x".....	99
Figura 3.28-I	Grafo con las interacciones del centroide "y".....	99
Figura 3.28-II	Jerarquía de la interacción del subsistema con origen en "y".....	99
Figura 3.29	Las tres relaciones de este subsistema (z) prácticamente son equivalentes.....	100
Figura 3.30	Resultados de probabilidad de interacción para la totalidad del sistema.....	100
Figura 3.31	Representación de los resultados en forma de grafos.....	101
Figura 3.32	Estudios de la simulación de la red ferroviaria de Turquía.....	103
Figura 3.33	Unión mediante línea recta de las cimas del mapa tridimensional.....	103
Figura 3.34	Supresión de líneas paralelas entre cimas.....	104
Figura 3.35	Conformación de circuitos mediante la unión de los segmentos más cortos con su vecino más cercano.....	104
Figura 3.36	Red ajustada a las condiciones naturales del área: relieve y litoral.....	105
Figura 3.37	Grado de coincidencia entre la red real (línea continua) y la simulada (línea punteada).....	105

Figura 3.38	Conceptualización de las variables gravitacionales en el transporte.....	106
Figura 3.39	Problema hipotético de 4 zonas.....	108
Figura 3.40	Componente espacial del resultado obtenido de la modelación.....	110
Figura 3.41	Problema de tres zonas con sus respectivos tiempos de viaje y producción-atracción de viajes.....	111
Figura 3.42	Representación mediante grafos del resultado obtenido por el modelo gravitacional de distribución de viajes. Las flechas indican la interacción entre zonas y el número de viajes.....	115
Figura 3.43	Representación de un sistema espacial que contiene la información requerida por el modelo gravitacional compuesto.....	117

CAPÍTULO 4

Figura 4.1	Accesos principales que alimentan a la Ciudad de México.....	121
Figura 4.2	Ejemplo de la información en las escalas de análisis en la investigación. Escala regional y escala metropolitana.....	122
Figura 4.3	Representación del área de influencia de un aeropuerto.....	128
Figura 4.4	Ejemplo de la configuración espacial del sistema.....	128
Figura 4.5	Isócronas a partir del AICM.....	129
Figura 4.6	Isócronas a partir del Aeropuerto de Toluca.....	130
Figura 4.7	Isócronas para cada aeropuerto de la zona en estudio.....	130
Figura 4.8	Mapa simplificado a partir de las isócronas de cada aeropuerto.....	131
Figura 4.9	Transformación de isócronas a municipios.....	132
Figura 4.10	Procedimiento de conversión de isodápanas municipales utilizando centroides geométricos.....	133
Figura 4.11	Isocronsa municipales con origen en los aeropuertos.....	133
Figura 4.12	Isodápanas: en gris se representan los municipios con más de dos opciones.....	134
Figura 4.13	Municipios en competencia (en negro) por registrar los mismos tiempos de acceso a dos o más aeropuertos.....	135
Figura 4.14	Definición del área de influencia de cada aeropuerto: solución a los municipios en conflicto.....	136
Figura 4.15	Área de Influencia del Aeropuerto de la Ciudad de México. En azul, localidades representativas.....	138
Figura 4.16	Área de Influencia del Aeropuerto de Toluca. En azul, localidades representativas.....	139
Figura 4.17	Estructura por edades de cada área de influencia de los aeropuertos en estudio.	144
Figura 4.18	Mapa con la estructura del ingreso de los habitantes de cada área de influencia de los aeropuertos en estudio. Abajo: tabla resumen.....	145
Figura 4.19	Mapa con el nivel de estudios de los habitantes de cada área de influencia de los aeropuertos en estudio.....	145
Figura 4.20	Viajes, viajeros y frecuencia de viaje.....	147
Figura 4.21	Planteamiento del sistema espacial del caso de estudio. Se busca medir las interacciones entre los centros de masa para diseñar las rutas.....	148
Figura 4.22	Representación de las variables para calcular la interacción gravitacional de la localidad V1 del problema expuesto.....	149

Figura 4.23	Variables de masa: viajes, viajeros y frecuencia de viaje.....	150
Figura 4.24	Frecuencia de viaje y número de viajeros y viajes dentro de la zona de influencia del aeropuerto de Toluca.....	151
Figura 4.25	Conceptualización de la operación de geoprocesamiento “punto en polígono”.....	152
Figura 4.26	Escala metropolitana: AGEB que conforman la zona urbana de Toluca. En amarillo se muestran aquellas que contienen una localidad que puede utilizarse como nodo para la modelación. Las AGEB en verde tuvieron que asignarse a un nodo.....	152
Figura 4.27	Nodos obtenidos a partir de las localidades con mayor no. de habitantes en los municipios sin AGEB.....	153
Figura 4.28	Localidades puntuales dentro de la zona en estudio que se pueden utilizar como nodos para modelar.....	153
Figura 4.29	Centroides geométricos de las AGEB de la zona metropolitana de Toluca.	154
Figura 4.30	Centroides de AGEB y polígonos de Thiessen antes de hacer la unión espacial.....	154
Figura 4.31	AGEB asignadas según el polígono de Thiessen en el que se encuentra su centroide geométrico. A partir de esta zonificación es posible obtener la masa de cada nodo sumando las variables de cada unidad.....	155
Figura 4.32	Malla de polígonos de Thiessen para los centroides que se encuentran dentro del área de influencia del aeropuerto de Toluca.....	155
Figura 4.33	Nodos representados según el número de viajes total.....	156
Figura 4.34	Representación de las tres variables posibles de frecuencia de viaje sintetizadas en los nodos.....	157
Figura 4.35	Red pavimentada corregida topológicamente.....	158
Figura 4.36	Se observa que los centros de masa seleccionados, con la referencia del INEGI (rojo) no conforman una estructura arco-nodo con la red pavimentada. Centros corregidos en azul.....	158
Figura 4.37	Muestra de un registro de un par origen-destino de la matriz de impedancias.....	159
Figura 4.38	Ejemplo de una ruta óptima entre un par o-d de centros de masa. La matriz de impedancias está conformada por 48,841 pares.....	159
Figura 4.39	Resultado del cálculo de las impedancias (rojo) entre todos los pares origen-destino posibles de los centros de masa.....	160
Figura 4.40	Operación de geoprocesamiento “unión espacial” para concatenar tablas.....	161
Figura 4.41	Base de datos correspondiente a la cobertura de nodos.....	161
Figura 4.42	La tabla de la izquierda muestra la información origen-destino-impedancia. Los campos IDO e IDD corresponden al identificador único que se asignó a cada localidad con el fin de hacer vínculos para concatenar la información posteriormente.....	162
Figura 4.43	Operaciones de unión de tablas necesarias para obtener la estructura necesaria para el modelo (abajo).....	162
Figura 4.44	Base de datos con las variables utilizadas para modelar.....	164

Figura 4.45	Cálculo de la probabilidad de interacción entre cada par origen destino. Algunos campos fueron omitidos para facilitar la representación.....	165
Figura 4.46	Se representa la probabilidad de interacción de i con las localidades j respecto al total de interacciones de todo el sistema.....	165
Figura 4.47	Muestra con 5 índices de interacción con los subtotales por origen. La suma de todos los valores de este campo (221 nodos) es igual al 100% de la probabilidad de todo el sistema.....	166
Figura 4.48	Muestra de la tabla de nodos con su probabilidad de interacción total..	166
Figura 4.49	Nodos graduados por tamaño según la probabilidad de interacción que acumulan.....	167
Figura 4.50	Contornos de isoprobabilidades.....	167
Figura 4.51	Superficie de isoprobabilidad del total del área de influencia. Figura 4.51.II Acercamiento a la zona con mayor probabilidad. En la figura 4.51.I se distingue claramente que la interpolación rebasa los límites de influencia.....	168
Figura 4.52	Tras la conversión topológica de los límites de la zona de influencia del aeropuerto (azul) se asignaron valores cercanos a cero al índice de interacción de estos puntos con el fin de que el proceso de interpolación refleje la situación del sistema cerrado.....	169
Figura 4.53	Se aprecia que después de utilizar este procedimiento, la interpolación respeta los límites del área de influencia.....	169
Figura 4.54	Mapa de isoprobabilidad de interacción con intervalos graduados.....	172
Figura 4.55	Arriba: Graduación del intervalo 14 de la gráfica 4.8. Derecha: Visualización.....	173
Figura 4.56	Mapa de isoprobabilidad de interacción con intervalos graduados.....	174
Figura 4.57	Diagrama de las cuencas de captación de pasajeros (polígonos del 1 al 6) y rutas ideales para proporcionar el servicio de transporte al aeropuerto.....	175
Figura 4.58	Rutas que proporcionan el servicio óptimo bajo el criterio de menor tiempo de recorrido partiendo de los nodos con destino al aeropuerto...	176
Figura 4.59	Nodos e intersecciones de la red de rutas óptimas.....	177
Figura 4.60	Izquierda: Red de rutas óptimas segmentada según la topología, cada color de línea indica un segmento distinto. Arriba: Base de datos correspondiente con la estructura topológica arco-nodo.....	177
Figura 4.61	Mapa de jerarquía de los arcos de la red de rutas óptimas. El grosor y el color indican el número de rutas óptimas que pasan por cada segmento, es decir, el número de nodos que conecta cada arco.....	178
Figura 4.62	Según el criterio de número de conexiones de los arcos, existen cinco rutas principales que alimentan el servicio en el aeropuerto de Toluca.....	179
Figura 4.63	Mapa de interacción gravitacional y criterio de jerarquía de arcos óptimos. Aplican las simbologías antes mostradas.....	179
Figura 4.64	Sistema de 5 rutas propuestas para satisfacer la demanda pronosticada del aeropuerto de Toluca.....	182
Figura 4.65	Carga de pasajeros y ascensos de la ruta 1 Cuautilán Izcalli-Aeropuerto.....	184
Figura 4.66	Localización de las paradas propuestas para el recorrido de la ruta 1....	185

CONCLUSIONES

Figura 5.1 Representación conceptual de la evolución de las teorías de análisis espacial..... 188

Figura 5.2 Representación conceptual de los ancestros del modelo gravitacional.....189

ÍNDICE DE GRÁFICAS

CAPÍTULO 2

Gráfica 2.1 Comportamiento exponencial del gradiente de interacción espacial: Existen más interacciones conforme aumentan las unidades de separación espacial superadas..... 39

CAPÍTULO 3

Gráfica 3.1 Factores de tiempo de viaje para Washington, D.C., 1955..... 70

Gráfica 3.2 Efectos de beta, alfa y lambda en las interacciones espaciales..... 75

Gráfica 3.3 Valores del exponente Beta para transportación aérea en Chicago, 1949-1989..... 75

Gráfica 3.4 Correspondencia entre la distancia y la relación entre los viajes reales y previstos de pasajeros..... 76

Gráfica 3.5 Factores de impedancia por la separación espacial.....109

Gráfica 3.6 Factores de fricción para el problema de ejemplo..... 111

CAPÍTULO 4

Gráfica 4.1 Se observa que el 70% de la población total contenida en el área de influencia del AICM se encuentra en los municipios con tiempo menor a los 35 minutos de acceso..... 137

Gráfica 4.2 Se observa que el 63% de la población total contenida en el área de influencia del Aeropuerto de Toluca se encuentra en los municipios con tiempo menor a los 35 minutos de acceso..... 139

Gráfica 4.3 Frecuencia de los diferentes grupos de edades de los encuestados en las terminales de autobuses..... 143

Gráfica 4.4 Ocupación y frecuencia de viaje de los encuestados en las terminales de autobuses..... 143

Gráfica 4.5 Relación de los exponentes Alfa y Lamba con el número de viajes y el nivel de interacción..... 150

Gráfica 4.6 Distribución logarítmica de la interacción calculada para los 221 nodos.....170

Gráfica 4.7 Frecuencias de los rangos..... 170

Gráfica 4.8 Intervalos de magnitud de interacción hechos a partir de la distribución logarítmica de la probabilidad de interacción.....171

Gráfica 4.9 El 60% del total de segmentos de rutas óptimas tienen una jerarquía menor a 46 conexiones, en comparación el 20% hace de 75 a 113 conexiones.....178

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

Tabla 1.1	Relación entre los componentes de los SIG y sus principales funciones.....	27
Tabla 1.2	Algunas aplicaciones de los SIG en el transporte.....	32

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1.	Ejemplo de la estructura de los arcos para la modelación de redes de transporte mediante grafos.....	46
Tabla 2.2	Información requerida para la modelación del problema propuesto....	53
Tabla 2.3	Resultados obtenidos por la modelación de punto de ruptura.....	54
Tabla 2.4	Estructura de los datos para modelar el potencial de interacción.....	62

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1	Cálculo del tiempo de conducción sobre la red.....	78
Tabla 3.2	Estructura general de una matriz O/D.....	86
Tabla 3.3	Estructura de la matriz OD de la figura 3.15 para el uso de hoja de cálculo electrónica.....	88
Tabla 3.4	Matriz de separación espacial del ejemplo de aplicación.....	96
Tabla 3.5	Cálculo del índice de interacción gravitacional del ejemplo presentado.....	97
Tabla 3.6	Factores de impedancia tiempo de viaje para el problema hipotético...	109
Tabla 3.7	Aplicación del modelo gravitacional en el problema de ejemplo.....	110
Tabla 3.8	Matriz de impedancias con los factores de fricción para los pares o-d del ejemplo.....	112
Tabla 3.9	Cálculo del factor $A * F * K$	112
Tabla 3.10	Cálculo de la distribución de viajes entre zonas para el problema de ejemplo.....	113
Tabla 3.11	Cálculo de los nuevos factores de atracción A_j para la calibración del modelo.....	114
Tabla 3.12	Segunda iteración del calculo de la distribución de viajes entre zonas para el problema de ejemplo.....	114
Tabla 3.13	Segunda iteración del calculo de la distribución de viajes entre zonas para el problema de ejemplo.....	114
Tabla 3.14	Tabla con los resultados del modelo gravitacional de distribución de viajes.....	115
Tabla 3.15	Estructura general de una matriz O/D para flujos o impedancias.....	116
Tabla 3.16	Matriz O/D del sistema espacial de la figura 3.30.....	117
Tabla 3.17	La estructura de la matriz y el cálculo de T_{ij} en una hoja de cálculo....	118

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1	Matriz de asignación del ejemplo de la figura 4.14.....	134
Tabla 4.2	Ejemplo de municipios en conflicto y su respectiva asignación.....	135
Tabla 4.3	Resumen del análisis de tiempos de accesibilidad a nivel municipal....	136

Tabla 4.4	Síntesis municipal del área de influencia del AICM.....	137
Tabla 4.5	Síntesis municipal del área de influencia del Aeropuerto de Toluca.....	138
Tabla 4.6	Resumen de las características de los grupos identificados al analizar los resultados de la encuesta.....	142
Tabla 4.7	Resumen con los porcentajes en cada grupo de edad.....	144
Tabla 4.8	Resumen con los porcentajes según el grupo de ingresos.....	144
Tabla 4.9	Porcentaje de la población total que cumple con instrucción superior profesional.....	146
Tabla 4.10	Concentración de viajes y viajeros producto del análisis de regresión canónica. Destaca el aeropuerto de Toluca en segundo lugar.....	146
Tabla 4.11	Estructura de la matriz de impedancias con la información de orígenes y destinos concatenada.....	163
Tabla 4.12	Rangos propuestos a partir de los intervalos de magnitud de interacción logarítmicos.....	171
Tabla 4.13	Información estadística de las rutas del aeropuerto de Toluca.....	183
Tabla 4.14	Información estadística de los ramales de la ruta 1.....	183
Tabla 4.15	Información estadística de los arcos de la ruta 1.....	184

CONCLUSIONES

Tabla 5.1	Síntesis de las principales teorías de localización clásicas.....	192
-----------	---	-----