

ANÁLISIS ESPACIAL DE LAS REDES DE TRANSPORTE, EMPLEANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Dr. Luis Chias Becerril¹
Ing. Héctor Daniel Reséndiz López²

Palabras clave

Redes de transporte, accesibilidad, indicadores, densidad, proximidad, área de servicio, isocrona, índice de rodeo.

Resumen

La teoría general de la localización clasifica en cuatro grupos a los factores que condicionan el emplazamiento de todo tipo de actividades socioeconómicas: accesibilidad, jerarquía social, economías de aglomeración y externalidades. En el presente documento sólo se analiza el caso de la accesibilidad considerando que, no obstante la importancia que le atribuyen los economistas, ingenieros, geógrafos y sociólogos al transporte como factor clave del ordenamiento territorial, pocos autores explican y aplican los múltiples indicadores desarrollados para medir las intensas interacciones socioeconómicas que se registran a través de las redes de transporte a escala urbana, metropolitana, interurbana o global. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es demostrar la utilidad de algunos indicadores de accesibilidad, mostrando el procedimiento teórico y su aplicación con resultados obtenidos en distintos proyectos de investigación realizados en el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México por el grupo de investigación denominado Transporte y Organización del Territorio. Para cumplir con el objetivo del estudio es importante señalar que el polisémico concepto de accesibilidad ha sido bien estudiado por García Palomares (2000, 97), que nosotros retomamos de su estudio la definición de W.G. Hansen, entendiendo por accesibilidad el “*potencial de oportunidades para la interacción*” socioeconómica y que privilegiamos el enfoque de la *accesibilidad física* considerando las dificultades o facilidades derivadas de la red carretera para acceder a un sitio. La accesibilidad desde esta perspectiva se considera *atributo de sitio* y esta representada por la variable síntesis distancia/costo.

Abstract

The general theory of the location classifies in four groups all the factors that contribute to the location of all type of socioeconomic activities: accessibility, social hierarchy, economies of agglomeration and externalities. In this document the case of the accessibility is only analyzed, considering that, despite the importance that the economists, engineers, geographers and sociologists give to the transport as a

¹ Investigador titular del Instituto de Geografía (IGG) de la Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito Exterior, CU, CP 04510, D.F. México. Correo: lchias@yahoo.com

² Maestro en Ingeniería de Sistemas de Transporte. Colaborador del IGG. Correo: hresendizl@hotmail.com

key factor for the territorial ordering, few authors explain and apply the manifold indexes developed to measure the intense socioeconomic interactions that are registered through the networks of transport at urban, metropolitan, interurban or global scales. Therefore, the objective of this work is to demonstrate the utility of some indexes of accessibility, showing the theoretical procedure and its application with results obtained in different projects from investigation made in the Institute of Geography of the Autonomous National University of Mexico (UNAM) by the group of investigation denominated Transport and Organization of the Territory. In order to fulfill the objective of this study it is important to indicate that the concept of accessibility has been well studied by García Palomares (2000, 97), and we took of his study the definition of W.G Hansen, understanding by accessibility the “potential of opportunities for the socioeconomic interaction”. Also we privileged the approach of the physical accessibility, considering the difficulties or facilities derived from the highway network to access to a site. The accessibility from this perspective considers the site attributes and it is represented by the distance and cost.

INTRODUCCIÓN

El análisis espacial (AE) puede plantearse como una aproximación orientada hacia la investigación de modelos y leyes generales de los sistemas espaciales evidenciando sus propiedades, distribuciones, morfologías de organización, funcionamiento y evolución. El campo de aplicación de esta metodología analítica es extenso y siempre se apoya en diversos modelos y conceptos teóricos provenientes de diversas disciplinas como la física, matemáticas, economía y geografía entre otras. Con la evolución de la informática el AE se potencializa ya que es posible integrar métodos estadísticos, modelos matemáticos-económicos y diversos útiles de simulación con la componente espacial que brindan los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Las teorías, modelos y conceptos aplicados en el AE se sustentan sobre la existencia de leyes o reglas generales de espacialidad que permiten explicar los sistemas distinguiéndose dos enfoques: el que identifica las propiedades y estructuras de los sistemas geográficos que describen configuraciones estables mediante *modelos estáticos* y; el correspondiente a la simulación de los procesos genéticos y de evolución de los sistemas, tratándose entonces de *modelos dinámicos*. Ambos enfoques aplican y combinan métodos y técnicas muy diversas. Por ejemplo, puede emplearse la estadística clásica omitiendo en primera instancia la localización de los objetos y posteriormente complementarla con la cartografía para encontrar los efectos espaciales del problema en estudio. O bien, puede utilizarse la estadística espacial para analizar directamente la información geocodificada con ayuda de métodos geoestadísticos y morfológicos. De igual forma sucede con los métodos de análisis multicriterio que pueden incorporar la componente espacial en diferentes momentos.

La escala geográfica en el AE merece particular atención, pues el resultado e interpretación de las teorías y métodos aplicados depende del nivel de observación y agregación de los objetos geográficos, ya se trate de una escala "micro" con actores individuales o con entidades definidas a escalas meso y macrogeográfica. Por esta razón, el AE requiere frecuentemente de la combinación de diferentes escalas con el fin de entender los procesos y dinámicas según el nivel de organización y de análisis que se pretenda realizar de los objetos, fenómenos o procesos geográficos.

Actualmente el AE es empleado por muchas otras disciplinas además de la geografía para la planeación y ordenamiento del territorio, ingeniería, urbanismo, economía espacial (o ciencia regional) historia, agronomía, arqueología, ciencias del medio ambiente, etc. En este trabajo el AE se realizara utilizando como entidad fundamental las redes de transporte terrestre sobre todo la red carretera y las medidas de accesibilidad que nos indican el nivel de interacción socioeconómica que se puede establecer entre diferentes localizaciones o nodos representados por hospitales, escuelas, terminales y por supuesto ciudades o localidades rurales

El transporte desde la perspectiva de redes

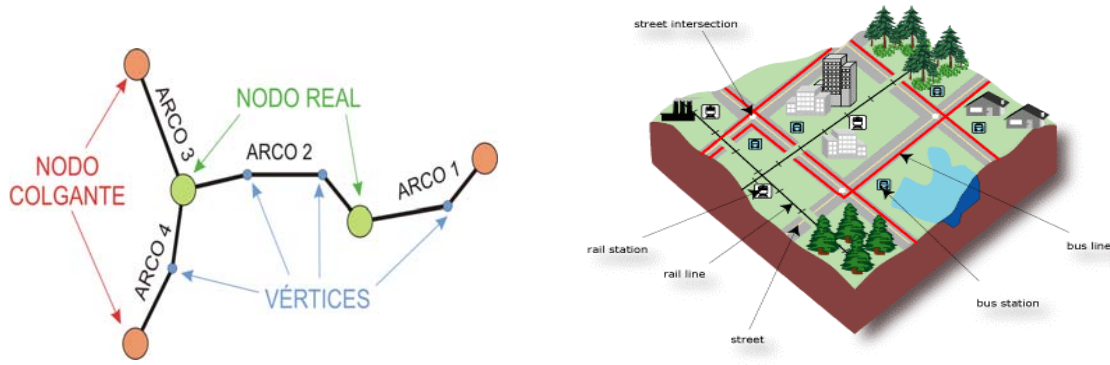
Antes de tratar los indicadores de accesibilidad, debe plantearse la definición general de “red” como *un sistema de arcos y nodos interconectados que permiten la circulación de flujos* de energía, agua, alimentos, enfermedades y por supuesto personas y mercancías, donde los arcos son los elementos a través de los cuales fluyen los recursos y los nodos, los sitios que conectan a los arcos facilitando su conexión. Los sistemas de transporte están compuestos de un complejo conjunto de redes de infraestructuras y sistemas de transporte que soportan las relaciones que se establecen entre la oferta y la demanda de múltiples productos y servicios.

El papel de las redes de transporte, además de articular los espacios de producción y de consumo, es vectorizar las interacciones del sistema urbano regional, que dependen en capacidad y extensión, de la política económica y territorial aplicada. De esas políticas se derivan sus atributos operacionales (modos de transporte, costos de pasajes y fletes, capacidad, eficiencia, seguridad, rentabilidad y velocidad del sistema) y territoriales (cobertura, extensión, accesibilidad diferenciada y por supuesto desigualdades espaciales).

Desde una perspectiva metodológica, la teoría de grafos permite el análisis de la forma, conexión y jerarquización de una red de transporte mediante una abstracción matemática utilizando un conjunto de propiedades, medidas e índices. Esta teoría constituye un tipo de análisis explicativo que permite conocer en base a datos parciales, que aspecto tiene la estructura completa de la red o su desarrollo (Potrykowski, Taylor, 1984). Además permite identificar problemas geográficos a partir de las relaciones entre los asentamientos urbano rurales y los sistemas de transporte locales, regionales y nacionales, atendiendo diversas propiedades topológicas de las redes (Hagget; 1976). En el AE los nodos de la red (representados por ciudades, hospitales, escuelas o bien, terminales terrestres, aéreas o marítimas) constituyen los puntos de origen y destino de los intercambios. Los arcos o aristas se identifican con las rutas, tanto si tienen una infraestructura física de soporte (rutas terrestres) como si no cuentan con ella (caso de las rutas marítimas o aéreas), también se asocian con los flujos de pasajeros, mercancías, información etc., que circulan por las redes con diferentes direcciones e intensidades. Los elementos fundamentales de una red son los siguientes: los nodos que definen la forma de un arco se llaman vértices; los nodos que se encuentran al final de los arcos se llaman nodos colgantes (dangle nodes) y los arcos se ensamblan solo en los nodos reales.

En la figura 1 se muestra un ejemplo de una red de transporte. Las calles se pueden modelar como arcos, las intersecciones de calles como nodos. Además existen arcos adicionales (red ferroviaria y rutas de transporte público) y elementos puntuales que funcionan como nodos (estaciones ferroviarias y paradas de autobús).

FIG. 1 ELEMENTOS BÁSICOS DE UNA RED: ARCOS, NODOS REALES, NODOS COLGANTES, VÉRTICES E INTERSECCIONES.



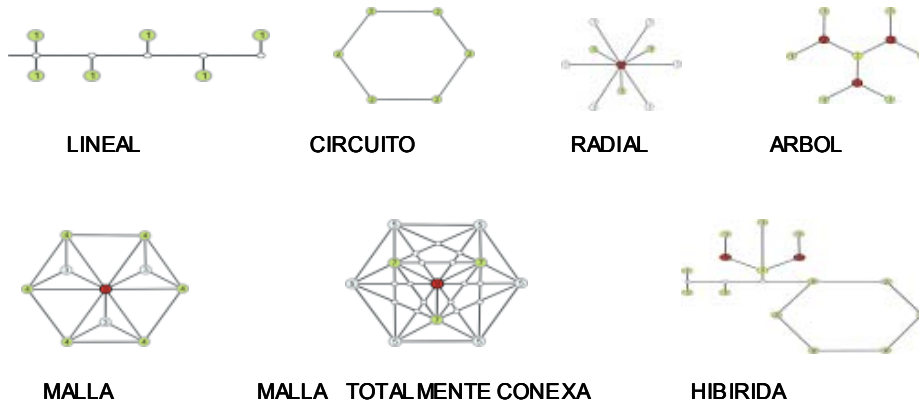
Fuente: imagen izquierda elaborada por los autores, derecha tomada de ESRI.

La eficiencia de una red puede medirse mediante la teoría de grafos puesto que cada elemento de la red tiene un nivel de accesibilidad distinto y por tanto, diferente relación entre la rentabilidad y el costo específico del acceso. La inequidad de las localizaciones puede medirse por la ausencia o presencia de uniones que tienen ciertos emplazamientos y por la intensidad de sus flujos de transporte. Los sitios con mejor accesibilidad resultan en general los más atractivos.

Morfologías de las redes de transporte

La estructura territorial de una región o país tiene estrecha relación con la estructura de sus redes de transporte y comunicación. El proceso histórico de construcción es un fiel reflejo de los modelos económicos aplicados, del desarrollo tecnológico del momento y por supuesto, de los procesos de apropiación territorial implementados. Si se acepta la idea de que el transporte es un *configurador territorial*, es posible identificar distintos tipos de redes (fig. 2) que atienden de manera diferencial las necesidades socioeconómicas de los territorios:

FIG. 2 TIPOS DE REDES



Fuente: Figura elaborada por los autores

En las redes lineales o de corredor todos los nodos están conectados a un eje principal y no existe otra conexión entre ellos. Es la estructura de red más sencilla, se presenta sobre todo en países subdesarrollados donde las vías de transporte constituyen ejes de penetración aislados y perpendiculares a la costa o sirven de enlace a ciudades distantes dejando el resto del territorio relativamente incomunicado. La falta de conectividad de la red permite que ciertos nodos queden desconectados segmentando la red en varias partes.

En la red de anillo o en circuito todos los nodos están interconectados formando un anillo por lo que, si algún nodo de la red se desconecta, se altera la conectividad de todo el circuito.

En las redes centralizadas existe un nodo con accesibilidad privilegiada que representa el elemento predominante. A este tipo de redes también se les conoce como *Redes con topología de estrella, radial o polar*, ya que conecta a todos los nodos mediante ejes o radios que confluyen a un nodo central. Consecuentemente, todos los nodos periféricos sólo se pueden comunicar con los demás a través del nodo central. Una falla en la línea de conexión de cualquier nodo secundario al nodo central provocaría el aislamiento de ese sitio con respecto a los demás. La topología de estrella la adoptan frecuentemente las redes en torno a las ciudades, por facilitar la alternancia de flujos centrífugos y centrípetos (movimientos pendulares) a través de las distintas horas del día. La forma de red en estrella es característica de los estados centralizados y responde más al establecimiento de relaciones sociales y económicas asimétricas que a objetivos de racionalidad territorial.

Redes descentralizadas

En las redes descentralizadas, a pesar de que el centro sigue siendo el lugar con mayor accesibilidad, la red esta conformada de tal manera que los subcentros incrementan sus niveles de accesibilidad. También se conocen como redes de topología jerárquica o *Redes con topología de árbol* pues responden al deseo de concentrar los flujos hacia un lugar único o al interés de difundirlos desde ese punto hacia el exterior. Pueden verse como una colección de redes estrella interconectadas y ordenadas en una jerarquía con nodos más avanzados que otros, lo que permite distinguir los diferentes sistemas conectados a la red. En este tipo de red existe un nodo de enlace troncal (también llamado nodo hub) desde el cual se ramifica la red y tiene un flujo jerárquico. Generalmente el enlace troncal conecta al nodo hub con otro nodo más avanzado que conecta a varios nodos periféricos. El árbol tiene nodos periféricos individuales que, como en las redes en estrella convencionales, pueden quedar aislados por un fallo puntual en la ruta de conexión del nodo. Además, si falla un enlace con algún nodo hub, la sección entera queda aislada del resto.

Las *redes con topología de malla* o de topología reticular están compuestas por ejes principales paralelos y perpendiculares. En ellas cada nodo está conectado a uno o más de los otros nodos, de manera que todas las comunicaciones existentes tienen dos o más rutas posibles. Esta topología, a diferencia de las

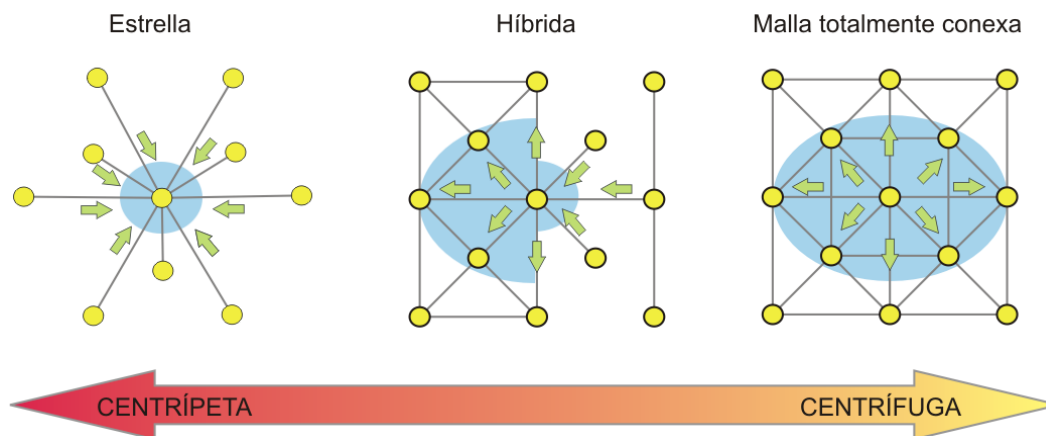
otras no esta dominada por un nodo central y son autorregenerables. La red puede funcionar incluso cuando una conexión falla, pues el resto de los nodos pueden evitar el paso por ese punto. En consecuencia, es la configuración con menor vulnerabilidad en su conectividad y aunque aparentemente representa a la red más costosa de construir, en el largo plazo es la que mejor responde a políticas ambiciosas de ordenamiento territorial y al desarrollo de los recursos potenciales de amplias zonas.

Las redes híbridas usan una combinación de dos o más topologías básicas distintas de tal manera que la red resultante no tiene forma estándar. Dos ejemplos comunes son: la de estrella en anillo que consta de dos o más topologías en estrella conectadas mediante un nodo hub centralizado o, la de estrella en corredor que consta de dos o más topologías en estrella conectadas mediante un corredor troncal (el corredor troncal funciona como la espina dorsal de la red).

Finalmente es importante señalar el efecto general que ejerce la morfología de las redes sobre la orientación de los flujos (Fig. 3). La estructura de las redes y su relación con la distribución de los orígenes y destinos tiene efectos *centrífugos* y *centrípetos* en términos de la accesibilidad que proporcionan a las localizaciones, y esa orientación se traduce en la estructura, organización y funcionalidad de los flujos, por ejemplo:

- Las redes que predominantemente funcionan con efectos centrífugos (también llamadas *redes centrífugas*), no tienen una centralidad tan dominante, los nodos tienen múltiples posibilidades de interacción y la red presenta una estructura topológica en forma de malla. Una red centrífuga proporciona diversas ventajas de especialización a múltiples localizaciones.
- Las *redes centrípetas* (o que funcionan con efectos centrípetos) tienen una fuerte centralidad y se distingue la existencia de nodos con mejor conexión que otros. Una red centrípeto favorece a un número limitado de localizaciones, la de malla a muchas.

Fig. 3 ESTRUCTURA DE REDES Y FLUJOS



Fuente: figura elaborada por los autores

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de los materiales

Para analizar la accesibilidad del territorio mexicano con ayuda de los SIG se utilizó información disponible en formato digital, considerando sus características de precisión, temporalidad y consistencia lógica, referente a su estructura y contenido general, para su introducción, manejo y análisis en ambiente SIG. Las variables utilizadas para calcular la accesibilidad fueron básicamente las siguientes:

1. La red de carreteras pavimentadas utilizada (cobertura lineal) proviene del Inventario Nacional de Infraestructura del Transporte 1997-2004 que realiza el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) con sistemas de posicionamiento global (GPS). La red contiene más de 32 000 arcos, cada uno de ellos con información referente al tipo de vía, número de carriles, jurisdicción y velocidad promedio asignada, en función de sus características geométricas y operativas (Tabla 1). Con las velocidades promedio y la longitud de los arcos se calculó en el SIG los tiempos de desplazamientos en cada uno de los arcos (costes de desplazamiento o impedancia de viaje).

TABLA 1 CARACTERÍSTICAS DE LA RED CARRETERA PAVIMENTADA UTILIZADA PARA EL ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD

TIPO DE VÍA	NÚMERO DE ARCOS	LONGITUD (KM.)	VELOCIDAD
Carretera Federal Cuota (pav.) 4 carriles	223	936.50	100
Carretera Federal Cuota (pav.) 2 carriles	84	306.09	95
Carretera Federal Libre (pav.) 4 carriles	1660	3401.97	95
Carretera Federal Libre (pav.) 2 carriles	12474	39045.19	90
Carreteras Concesionadas	1059	3830.22	100
Carretera Estatal Concesionada (pav.)	59	101.24	100
Carretera Estatal Cuota (pav.) 4 carriles	172	675.92	100
Carretera Estatal Cuota (pav.) 2 carriles	6	77.08	95
Carretera Estatal Libre (pav.) 4 carriles	652	1113.92	95
Carretera Estatal Libre (pav.) 2 carriles	18401	43044.70	90
Carretera Estatal Libre (pav.) 1 carril	13	11.77	60
Carreteras Municipales (pav.) 2 carriles	21	39.57	80
Caminos Rurales (pav.) 2 carriles	310	620.12	75
Paso por ciudad	165	374.05	30
Zona Urbana D.F.	132	143.76	30

Fuente: Inventario de infraestructura del transporte, IMT y, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, México, 2004

2. La localización y clasificación de puertos, aeropuertos y estaciones ferroviarias del Inventario de Infraestructura del Transporte y datos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes del 2000 y del 2004.

3. Del Nomenclator de Localidades del XI Censo de Población del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) del 2000, se tomó en cuenta la ubicación puntual de cada asentamiento humano, la población total al año del levantamiento y el nombre de la localidad; se utilizaron cerca de 200 mil localidades (asentamientos humanos con 1 y más habitantes) haciendo un total de casi 100 millones de habitantes.

4. Modelo de Elevación Digital del Terreno con cobertura de todo el territorio mexicano: se utilizó para elaborar el esquema cartográfico de accesibilidad tridimensional; elaborado por el Instituto de Geografía, UNAM. El tamaño de celda es de 100 m. La información referente a la altitud del terreno es importante para estudios físico-geográficos (geomorfológicos, hidrológicos, edafológicos, etc.), y socioeconómicos (planeación, desarrollo urbano y regional, etc.). Consecuentemente, se han desarrollado diversos algoritmos para facilitar el análisis automatizado del relieve terrestre, permitiendo entre otras operaciones, el cálculo de pendientes y la cuantificación de volúmenes de una superficie.


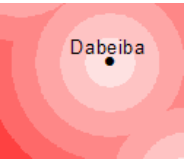
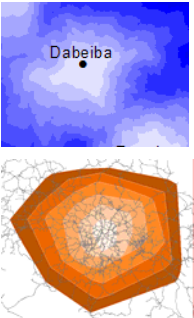
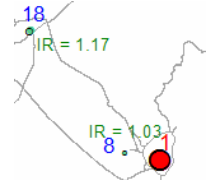
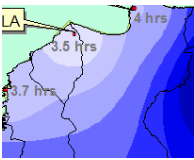
5. Las diferentes coberturas temáticas generadas se manejaron bajo el sistema de proyección Cónica Conforme de Lambert, y como Datum, Clarke 1866, por ser estos los más adecuados para la representación del territorio mexicano.

6. Como herramienta principal del trabajo mostrado, se emplearon los SIG, que se pueden definir como instrumentos de gran utilidad para la prospección del territorio que entre sus principales características destaca la posibilidad de efectuar múltiples y complejos análisis espaciales a partir de la información contenida en bases de datos diversas. Las numerosas variables físicas y socioeconómicas almacenadas, permiten elaborar complejos modelos de la realidad, cuya diversidad y potencialidad guarda estrecha relación con las características y capacidades del software que conforma el sistema. Haciendo referencia a lo anterior, el software de SIG empleado en el presente trabajo fue ArcVIEW GIS 3.3 en conjunto con diversas extensiones para el análisis espacial, principalmente Network y Spatial Analyst.

Una de las principales ventajas de desarrollar análisis espaciales en torno al transporte, y en particular a la accesibilidad bajo un ambiente SIG, radica en la posibilidad de la experimentación y elaboración de diversos escenarios. El desarrollo del conocimiento y la tecnología SIG permite estudiar eventos de gran complejidad, con suma rapidez y de diversas maneras, posibilitando la identificación precisa y oportuna de tendencias, nuevos patrones, formas de asociación/disociación y, sobre todo, posibilitar adecuadas soluciones a partir de cuestionamientos del tipo: ¿Qué pasaría si ocurriera cierto fenómeno en determinado momento y espacio? (Trevor et al., 1995).

Los indicadores de accesibilidad utilizados se esquematizan en la siguiente tabla

TABLA 2 INDICADORES DE ACCESIBILIDAD DE REDES

MEDIDAS DE	CONCEPTO	VARIABLES	FORMULAS
DENSIDAD 	Densidad vial por superficie (Dvs)	L = Longitud vial (km)	Dvs = L/S
	Densidad vial de la red por población (Dvp)	S = Superficie en km ²	Dvp=L/H*1000
	Coefficiente de Engel (K)	H = Número de habitantes	$K = L / \sqrt{HS} * 100$
La aplicación de los indicadores utilizando una malla incrementa precisión en el análisis			
PROXIMIDAD COBERTURA 	Cercanía/lejanía de nodos a la red	<ul style="list-style-type: none"> Localidades o nodos (ciudades, hospitales, escuelas, etc.) Red vial Localidades con información sobre población 	Cálculos realizados con Algoritmos del SIG: <ul style="list-style-type: none"> Áreas Buffer Sobreposición topológica de localidades sobre buffers
	Cobertura territorial de la red		
	Cobertura demográfica		
ACCESIBILIDAD 	Tiempo/costo Pendiente Topoformas Accesibilidad	Red vial con topología	Uso de algoritmos de distancia /costo y rutas óptimas en los SIG Aplicación de criterios para clasificar el relieve y asignación de rangos de velocidad por tipo de camino en la red de transporte.
	Área de servicio Isócrona Ruta óptima Impedancia	Modelo Digital de elevación Tiempo/velocidad de desplazamiento por tipo de camino Localidades con población	
ÍNDICE DE RODEO 	Distancia Real (DR)	Distancia real en km desde cada localidad considerada al resto de los nodos	$IR_i = \frac{\sum_{j=1}^n DR_{ij}}{\sum_{j=1}^n DI_{ij}}$
	Distancia Ideal (DI)	Distancia en línea recta en km, desde cada localidad considerada al resto de los nodos	
	Rutas óptimas		
	Diagramas spider		
TIEMPOS MEDIOS 	Centroide	Localidades conectadas a la red de transporte (N)	$TM = \sum \frac{t_{ij}}{N}$
	Árboles de Caminos	Rutas óptimas que conforman árboles de caminos (tij)	
	Tiempo de conducción	Matrices Origen – Destino	

Fuente: tabla elaborada por los autores.

Los algoritmos y herramientas de los SIG permiten realizar análisis de las redes con enfoques y objetivos diversos, estos pueden agruparse en: 1) análisis de topología y conectividad, 2) análisis de proximidad-cobertura y densidad y 3) análisis de rutas óptimas y flujos.

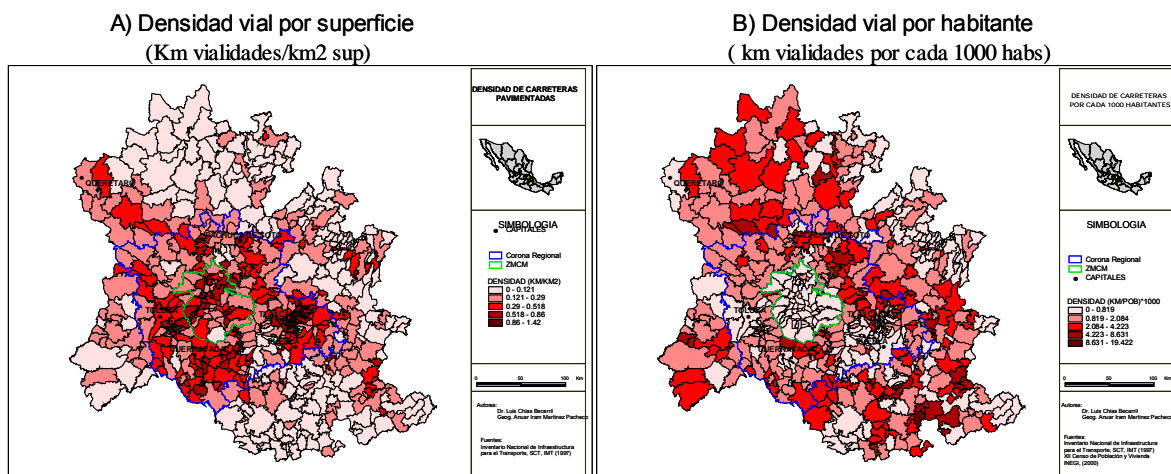
APLICACIÓN Y REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA DE LOS INDICADORES DE DENSIDAD VIAL

La Densidad de una Red Vial, integrada por carreteras o vialidades urbanas (calles, avenidas, calzadas, etc.) es un indicador que permite calcular el número de segmentos y su longitud en metros o kilómetros lineales, información que se puede correlacionar con la superficie que conecta (medida en kilómetros cuadrados) o con la población (número de habitantes) a la que puede atender. Los dos indicadores tradicionales derivados de la densidad vial son por lo tanto: la Densidad vial por superficie (Dvs), que permite identificar los territorios relativamente bien o mal comunicados y la Densidad vial por población (Dvp), que sirve para conocer los sitios donde la presión de la población puede saturar o no la disponibilidad de infraestructura vial. Las variables que se requieren para calcular estos indicadores y las formulas para su aplicación están indicadas en la tabla 1.

Este método requiere tener dos coberturas en el SIG, una de tipo poligonal (para calcular áreas: municipios, estados, etc.) y otra de líneas o puntos (para determinar la longitud de la red vial y el número de puntos contenidos o atributos de estos como sería el número de habitantes por localidad). Con la operación de geoprocésamiento se intersectan las dos coberturas para dividir los tramos según estén contenidos en cada municipio o polígono analizado, generando la zona geográfica común entre los dos temas.

Con la medida de densidad y la aplicación de las formulas correspondientes (Tabla 2), se pueden elaborar mapas de color graduados para conocer los patrones de distribución de la infraestructura vial. A continuación se muestran dos mapas (Fig. 4) elaborados para la Región Centro de México que permiten conocer las zonas (conjuntos de municipios o polígonos) que tienen baja, mediana y alta densidad vial por km^2 de superficie (Dvs), así como los territorios donde la población ejerce fuerte presión sobre este tipo de infraestructura, es decir donde hay mucha, regular o baja cantidad de habitantes por km de vialidades (Dvp).

Fig. 4 MAPAS DE LA REGIÓN CENTRO DE MÉXICO



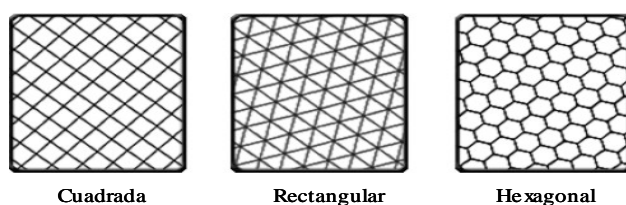
Fuente: Modelos elaborados por los autores

Los mapas de densidad se acompañan generalmente de reportes estadísticos por entidad, por regiones o por zonas considerando el número de municipios que se encuentran en cada rango establecido, así como la superficie, el nivel de densidad vial y las localidades (rurales, urbanas o metropolitanas) y habitantes de cada zona estudiada.

Es importante señalar que en estos indicadores de densidad pueden presentar dos tipos de sesgos: 1) por el distinto tamaño de los polígonos (los municipios pequeños pueden registrar los valores más altos y viceversa) o 2) por la diferente cantidad de habitantes contenidos en cada municipio mexicano (los de mayor población tendrán los valores más bajos y viceversa). Para evitar los sesgos mencionados se pueden aplicar los siguientes métodos:

- El Índice de Engel cuya fórmula (Tabla 2) está pensada con el fin de encontrar los territorios en los que la superficie, la población y la infraestructura vial se encuentran mejor distribuidos. Este índice se puede interpretar por lo menos de dos maneras: para identificar los sitios en los que la infraestructura vial todavía puede garantizar servicios de transporte, o también para identificar aquellos territorios hacia los que se podrían promover procesos de descentralización productiva o de generación de servicios, en función de la disponibilidad de infraestructura vial. En todo caso el resultado es un escenario distinto al de los indicadores tradicionales de densidad.
- También se puede recurrir al empleo de distintos tipos de mallas o retículas para homogeneizar el espacio.

Fig. 5 TIPOS DE MALLAS O RETICULAS

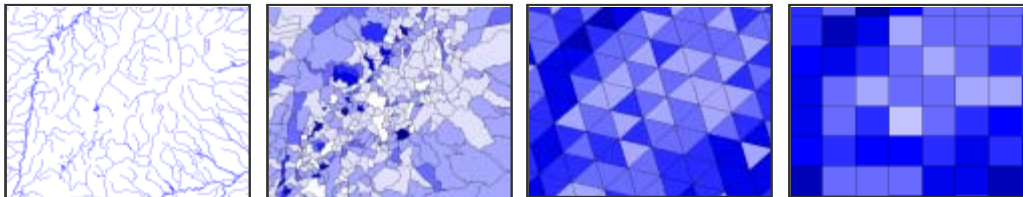


Fuente: Figura elaborada por los autores

Respecto al tamaño y forma de las mallas se debe probar, hasta encontrar el mejor resultado en función de la escala del territorio y del tipo de evento analizado. Sin embargo, las fórmulas y su procedimiento metodológico es similar al de los índices de densidad por superficie o por población, para esto existen varios criterios: 1) Deben ser consistentes con la escala de análisis, es decir, si se trata de áreas extensas, como los municipios, el área de la malla no debe ser muy pequeña. 2) La forma de la malla debe corresponder a la forma de los objetos en análisis, esto con la finalidad de cuantificar lo menos posible los vacíos de información (elementos de la malla con valores nulos). Este es el caso de carreteras o los cauces de los ríos.

Las siguientes figuras muestran el análisis de densidad para una red hidrológica utilizando como unidades territoriales primero a los límites municipales, después diversos tipos de mallas (triangular y cuadrada) para una misma zona. Los valores resultantes en todos los casos son diferentes como puede observarse.

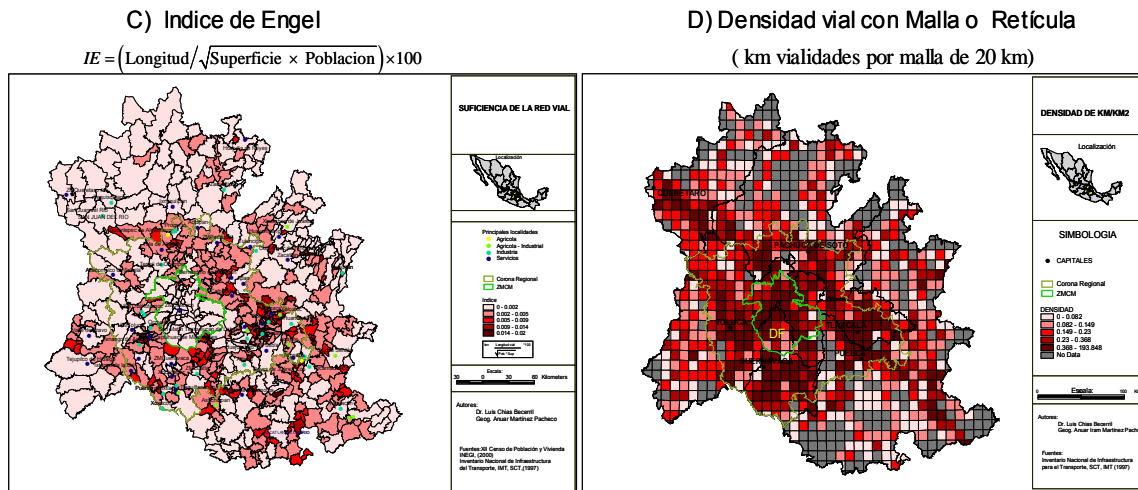
Fig. 6 RED HIDROLÓGICA REPRESENTADA CON DISTINTOS TIPOS DE MALLAS



Fuente: Figura elaborada por los autores

La aplicación de estos indicadores se pueden apreciar en los siguientes mapas (Fig. 7) que se elaboraron para al Región Centro de México

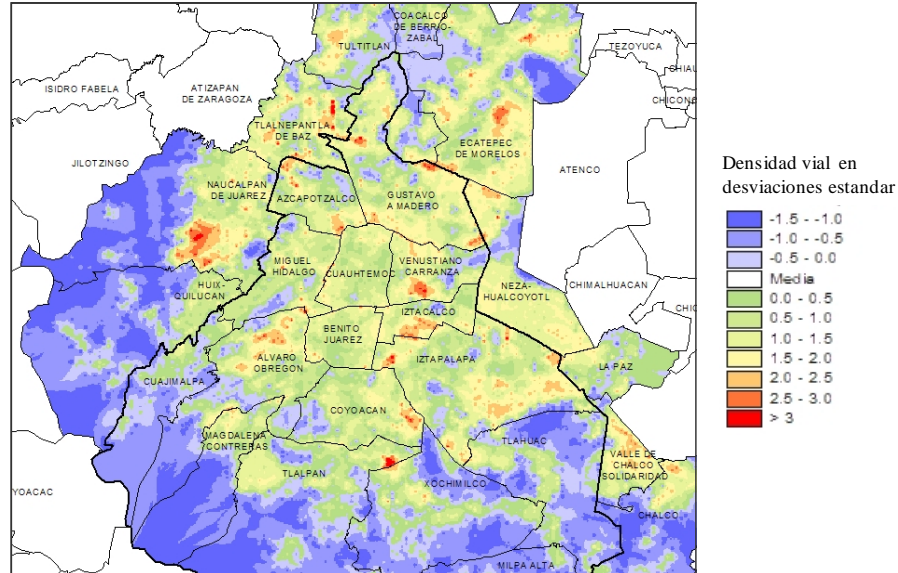
Fig. 7 MAPAS DE LA REGIÓN CENTRO DE MÉXICO



Fuente: Figura elaborada por los autores

Para concluir con los indicadores de densidad vial, otra forma de representarlos es utilizando un proceso de interpolación (a partir de las áreas estadísticas que se utilicen) como el que se muestra en la figura 8, en la que se analiza el kilometraje de todo tipo de calles del Distrito Federal y municipios conurbados del Estado de México. Este procedimiento ha permitido generar modelos cartográficos de la infraestructura vial, de gran interés para la administración de la capital mexicana, incluyendo los reportes estadísticos por tipo de vialidad para cada delegación y/o colonias (figuras jurídicas administrativas en que se divide al Distrito Federal).

Fig. 8 MAPA DE DENSIDAD VIAL DEL DISTRITO FEDERAL, MÉXICO



Fuente: Modelo cartográfico elaborado por los autores

APLICACIÓN Y REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA DE INDICADORES DE PROXIMIDAD Y-COBERTURA

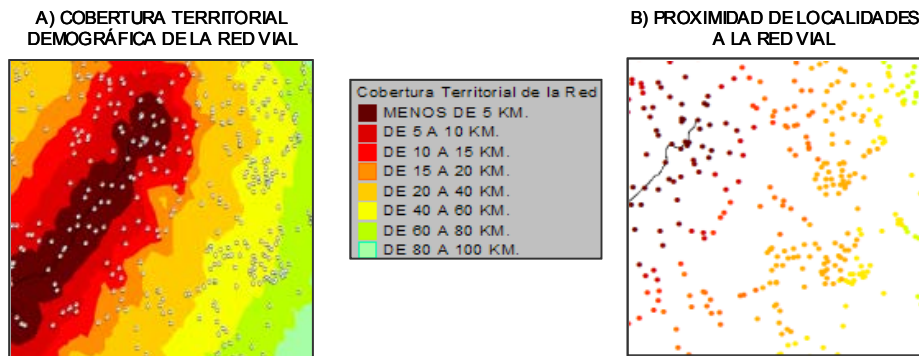
Utilizando las aplicaciones (algoritmos) que tienen incorporados los SIG para realizar buffers o áreas de influencia, es posible calcular la distancia (proximidad o lejanía) a la que se encuentran de la carretera más cercana (en línea recta o considerando la fricción del relieve) las ciudades, hospitales, escuelas, etc. Además, como el buffer permite calcular la superficie del territorio en cada rango de distancia utilizado es posible determinar la "cobertura territorial" de la infraestructura vial estudiada, y si a esos buffers se sobreponen topológicamente los poblados que se encuentran en su área de influencia, también se puede elaborar el modelo cartográfico que represente la "cobertura demográfica" de la red vial para cada rango-distancia definido previamente. Los insumos básicos para realizar este tipo de análisis son:

- Localizaciones puntuales de los elementos a evaluar.- ciudades, poblados, hospitales, escuelas, etcétera.
- Red de transporte en forma de polilínea. No es necesario para este análisis que la red tenga topología, pero se recomienda que la tenga
- Otros elementos.- como el modelo del relieve y el cálculo de pendientes del terreno.

El método consiste básicamente en calcular los buffers (polígonos que encierran el área de influencia resultante de dar una determinada distancia en torno a un punto, línea o polígono). Posteriormente se hace una intersección de las áreas (buffers) resultantes con las localizaciones puntuales y se cuantifican los resultados. Para el análisis de proximidad considerando la forma del relieve, se

requiere el uso de algoritmos de distancia-costo, como los contenidos en la extensión Spatial Analyst de ArcView.

Fig. 9 MAPAS DE COBERTURA Y PROXIMIDAD CONSIDERANDO LA FRICCIÓN DEL RELIEVE

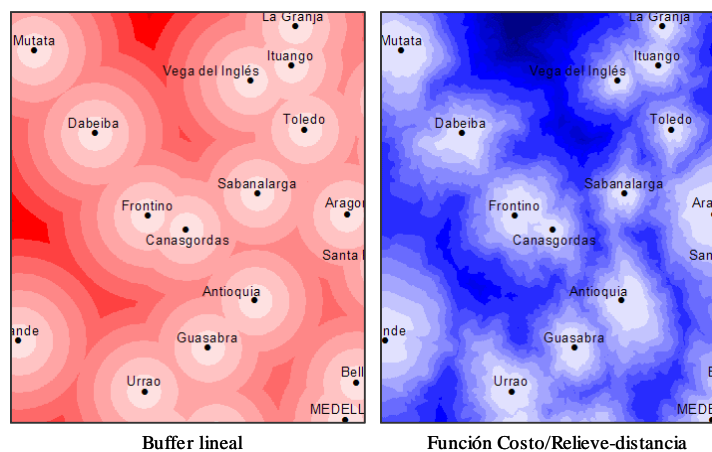


Fuente: Modelos cartográficos elaborados por los autores

En el modelo A, se delimitaron buffers de anchura variable a partir de un segmento de la red carretera con un algoritmo que considera la influencia del relieve sobre la accesibilidad, con la finalidad de estimar la cobertura territorial teórica del camino estudiado. Con este análisis se puede conocer la superficie que se encuentra en diversos rangos. Los puntos blancos de la figura A representan las poblaciones que se localizan a lo largo y ancho de la red carretera, dato con el que se puede calcular la cobertura demográfica de los caminos es decir, el número de localidades y número de habitantes que se encuentran en cada rango distancia definido previamente, generando reportes estadísticos y cartográficos de gran utilidad. En la figura B, se calculó la distancia de cada poblado a la carretera (línea negra de la figura) mediante una operación de intersección entre las coberturas de la figura A. Los distintos rangos de color en las poblaciones indican el rango de proximidad que tienen al segmento de la red analizado.

En el análisis de la accesibilidad es evidente que el factor fisiográfico influye notablemente, esto se puede apreciar de manera clara en las siguientes imágenes (fig. 10) que corresponden a un análisis de proximidad bidimensional utilizando áreas buffer y otro donde se aplica la función costo/relieve-distancia a partir de algunos poblados del municipio de Antioquia, Colombia.

FIG. 10 POBLADOS DEL MUNICIPIO DE ANTIOQUIA, COLOMBIA.



Fuente: Modelos elaborados con información de INFOVIAS, DANE y ESRI.

ANÁLISIS DE RUTAS ÓPTIMAS Y FLUJOS

Una ruta es un conjunto de uniones consecutivas que involucran nodos diferentes en una red. Tiene origen y destino, además pueden existir paradas intermedias. La ruta óptima entre dos puntos dentro de una red topológicamente construida considera el menor costo posible utilizando diversos algoritmos, los más conocidos son los de Moore (1957) y Dijkstra (1959). Para ejemplificar el funcionamiento general de estos algoritmos vea la figura 11. 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.

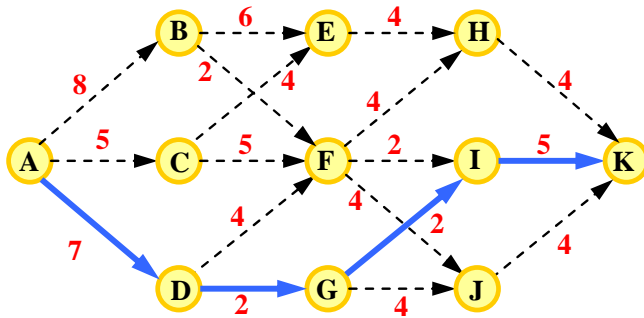


FIGURA 11. GRAFO QUE REPRESENTA UN SISTEMA DE CIUDADES COMUNICADAS POR LA RED VIAL. EN COLOR AZUL SE REPRESENTA LA RUTA ÓPTIMA QUE MINIMIZA EL COSTO ENTRE EL NODO A Y EL K.

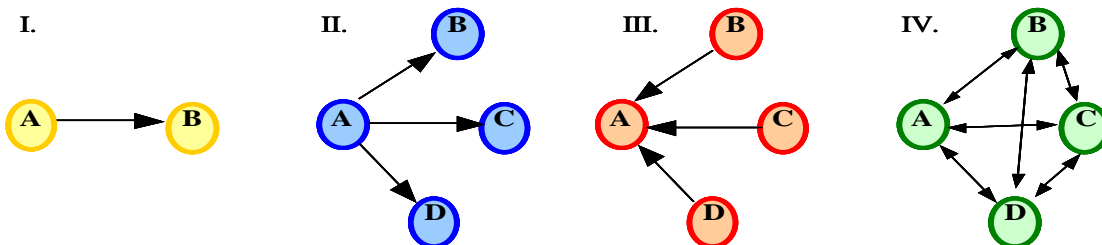
Fuente: Los autores

El algoritmo de Moore-Dijkstra analiza todas las trayectorias posibles entre diversos puntos y elige aquellos que representan 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 $7+2+2+5=16$.

Aunque la literatura sobre el tema agrupa los problemas de rutas óptimas en formas diversas, es posible discernir que en general existen 4 tipos de análisis (Fig. 10):

- I) Problemas 1 a 1 (un origen - un destino).
- II) 1 a muchos (un origen con múltiples destinos)
- III) Muchos a 1 (múltiples orígenes con un destino)
- IV) Todos a todos (múltiples orígenes con múltiples destinos)

FIG. 12 TIPOS DE PROBLEMAS DE RUTAS ÓPTIMAS



Fuente: Figura elaborada por los autores

ÁRBOLES DE CAMINOS, ISOCRONAS Y ÁREAS DE SERVICIO

Dentro de las categorías de la teoría de grafos, se llama árbol a un conjunto de arcos y nodos unidos entre sí (fig. 13) de tal modo que no haya más de una vía de enlace entre cada par de nodos. Por consiguiente, un árbol de n nodos se compondrá de $n-1$ arcos. Vea la figura 11, 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).

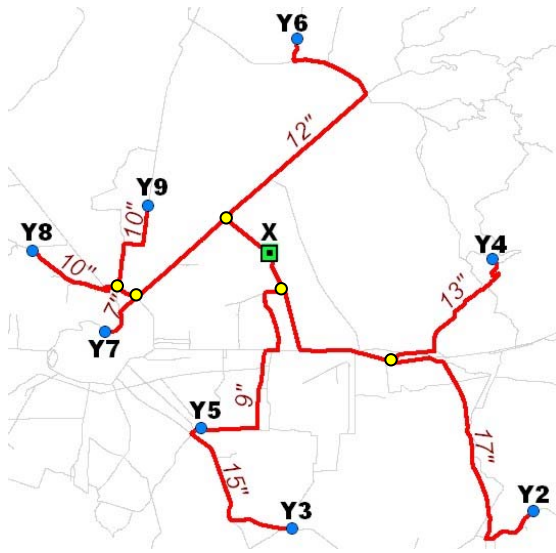
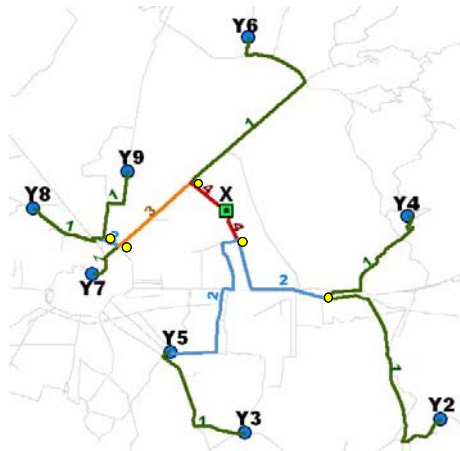


FIG. 13 IZQUIERDA: ÁRBOL DE CAMINOS CON EL TIEMPO DE RECORRIDO ENTRE CADA PAR O-D (ORIGEN-DESTINOS) SEGÚN LAS IMPEDANCIAS CONTENIDAS EN LA RED VIAL (FONDO). ABAJO: TABLA CON LA ESTRUCTURA DE LOS DATOS EN UN SIG.

FUENTE: LOS AUTORES

Shape	Origen	Destino	Tiempo (min)
PolyLine	X	Y 7	7
PolyLine	X	Y 5	9
PolyLine	X	Y 9	10
PolyLine	X	Y 8	10
PolyLine	X	Y 6	12
PolyLine	X	Y 4	13
PolyLine	X	Y 3	15
PolyLine	X	Y 2	17

El análisis de *jerarquía de arcos* a los árboles de rutas óptimas (figura 14) consiste en segmentar las rutas óptimas en sus intersecciones y estimar el número de arcos sobrepuestos.



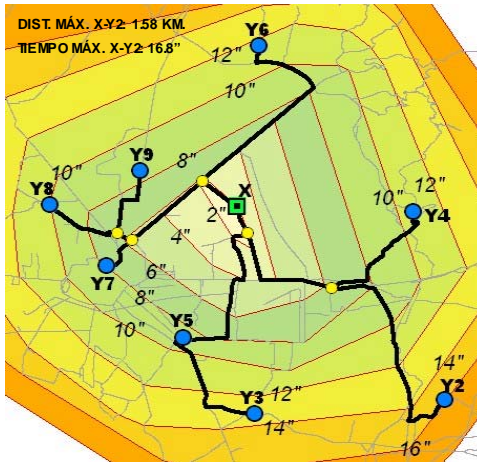
En la figura 14 de la izquierda, los números sobre los arcos indican el número de veces que es utilizado para comunicar el nodo "X" con algún nodo "Y".

Fuente: Figura elaborada por los autores

El análisis de jerarquía de arcos permite identificar la conectividad de los nodos y arcos significativos 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 pues indica puntos de entrada y salida al núcleo del área de estudio.

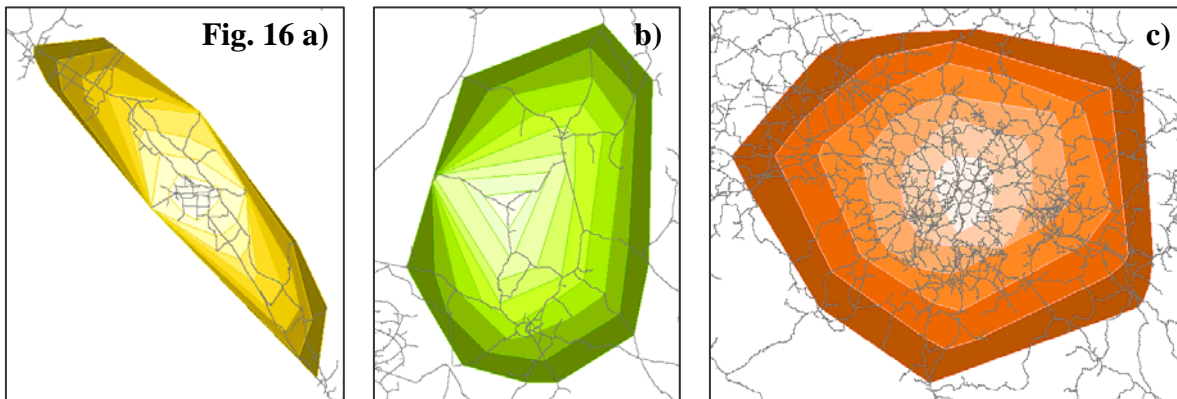
Fig. 15 ÁREA DE SERVICIO EN INTERVALOS DE 2 MINUTOS DE TIEMPO DE CONDUCCIÓN SOBRE LA RED VIAL A PARTIR DEL NODO X.

Los árboles de caminos también permiten calcular isocronas, es decir líneas que marcan igual tiempo de recorrido y que se utilizan para delimitar las Áreas de Servicio o zonas delimitadas considerando criterios de accesibilidad para determinados productos o servicios. En la figura de la derecha se muestran los resultados obtenidos por las rutas óptimas en intervalos o isocronas 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.



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

La estructura de la red y el punto e origen delimitan la forma del área de servicio, como se muestra en la figura 16. En la figura a) se muestra el análisis correspondiente a una red con estructura de corredor, en b) a una red híbrida partiendo de un extremo y en c) a una estructura radial partiendo de su centro.

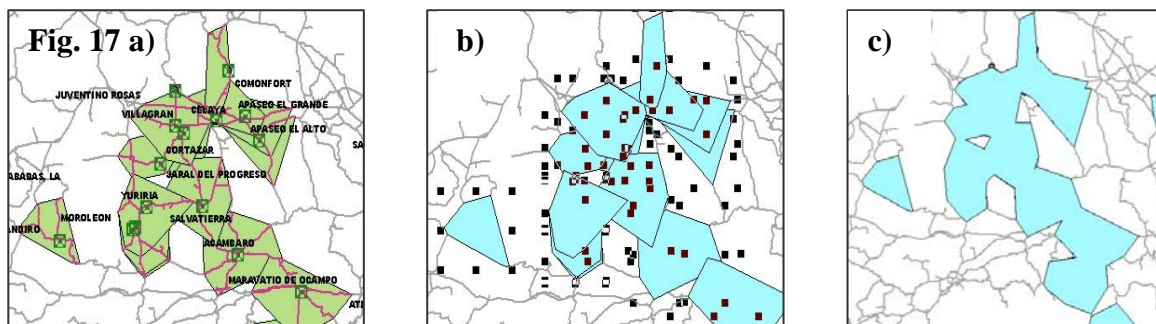


Para elaborar las isocronas y áreas de servicio se requiere:

- Un tema lineal que contenga una red vial con *topología*.
- Un tema puntual que contenga las localizaciones sobre las que se desean generar las isocronas

Procedimiento

- Este análisis requiere que el SIG contenga herramientas para el análisis de redes, como el caso de Network Analyst, de ArcView.
- Debe calcularse la impedancia para los arcos de la red. Puede ser la longitud de cada arco, el tiempo de desplazamiento o el costo económico.
- Posterior al análisis, puede ser necesario hacer una limpieza topológica de los polígonos como se muestra en las siguientes imágenes.



En la figura 17 a) se muestra el análisis de áreas de servicio para varios poblados utilizando un tiempo de conducción sobre la red de transporte de 60 minutos. En b) se hace una operación de unión a todos los polígonos, c) es el resultado de este geoproceso.

La figura siguiente (17 d) muestra la forma en la que se calcula un anillo de isocrona. Son necesarias 2 coberturas poligonales, el área de servicio con el rango superior y la del rango inferior (en este caso 60 y 45 minutos). Entre ambas coberturas se hace una operación de resta, dando como resultado la franja con el área de servicio de 46 a 60 minutos.

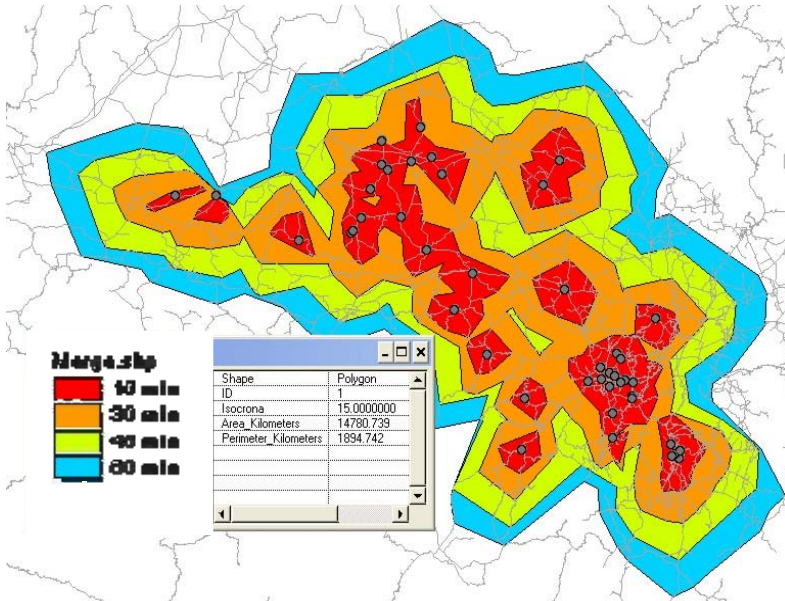
FIGURA 17. PROCEDIMIENTO PARA EL CALCULO DE ANILLOS DE ISOCRONAS



Fuente: imágenes elaboradas por los autores

Esta aplicación se utilizó para delimitar las áreas de influencia del Sistema Urbano de México. En la figura 18, sólo se muestra el análisis de la Cuenca Alta del Río Lerma. Con este procedimiento se generan todos los anillos que se deseen incluir en el análisis, finalmente se hace una operación de unión y se asigna una simbología de color graduado como se muestra en la figura siguiente.

FIG. 18 AREAS DE SERVICIO DE LAS PRINCIPALES CIUDADES DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO LERMA, MÉXICO.



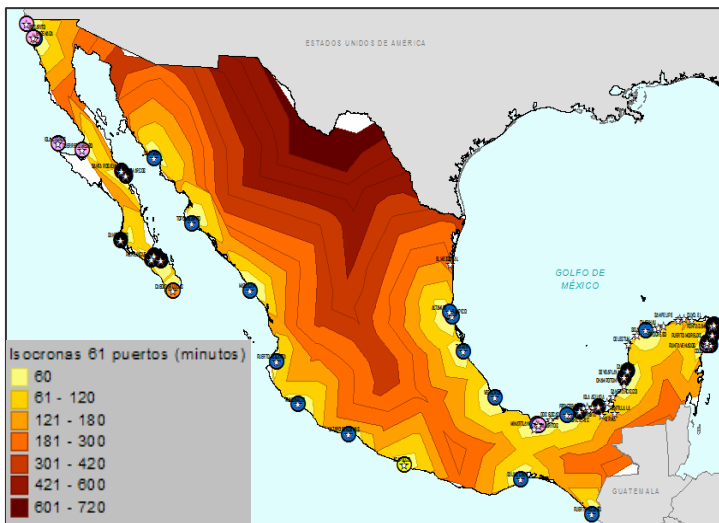
El resultado permite identificar:

- 1) Los subsistemas que tienen proximidad temporal y 2) aquellas zonas con poca accesibilidad considerando el desplazamiento sobre la red de transporte partiendo de los orígenes seleccionados previamente (principales ciudades). Otras aplicaciones se muestran a continuación.

Fuente: modelo elaborado por los autores

En los siguientes modelos cartográficos se muestran las Áreas de Servicio que se calcularon para los principales puertos comerciales de México (fig. 19) aplicando isocronas de distintos tiempos. El resultado se combinó con el análisis de la densidad de población (fig. 20) utilizando esas mismas isocronas, para identificar donde se encuentra teóricamente la mayor demanda de servicios portuarios (de 3 a 5 horas de recorrido por carretera pavimentada)

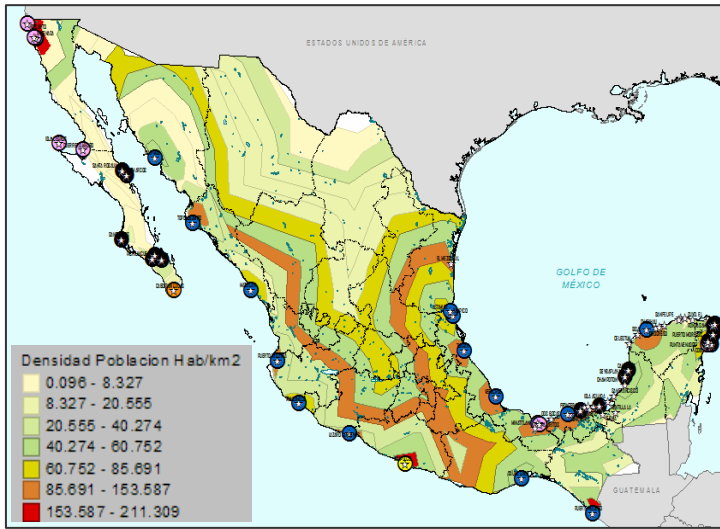
FIG. 19 MODELOS CARTOGRAFICOS DE ÁREAS DE INFLUENCIA DE LOS PRINCIPALES PUERTOS COMERCIALES DE MÉXICO



Para la elaboración de los mapas que se muestran a la izquierda fueron fundamentales los siguientes puntos:

- 1) Contar con una red de transporte adecuada, con topología y atributos de costo.
- 2) Información censal agregada puntualmente, es decir información estadística en los poblados.
- 3) La localización de los puertos.

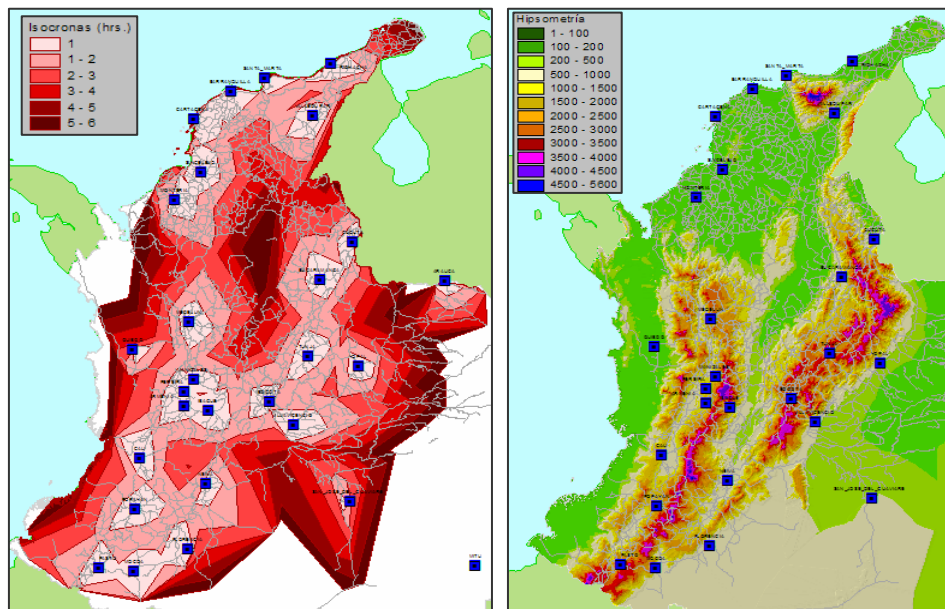
FIG. 20 MODELO CARTOGRÁFICO PARA EL ANÁLISIS DE DENSIDAD DE POBLACIÓN



Una vez elaborados los anillos de las áreas de servicio, se hizo una sobreposición topológica con la cobertura de poblados con el fin de cuantificar la población contenida en cada franja. Se observa claramente que México presenta la mayor densidad de población en el intervalo de 180 a 300 minutos (3 a 4 horas)

En el siguiente ejemplo se modelaron las isocronas a cada hora para identificar las áreas de servicio de las principales ciudades de Colombia (fig. 21) utilizando la red de caminos de INFOVIAS con velocidades teoricas asignadas a sus similares utilizados en México (mostradas en la tabla 1). El resultado permite identificar corredores costeros relativamente bien comunicados, así como ver la influencia del relieve en la articulación de los sistemas urbanos del centro y el relativo aislamiento de algunas ciudades y ciertos territorios ya sea por el efecto del relieve, la selva o bien la falta de infraestructura vial.

Fig. 21 MODELO DE ÁREAS DE SERVICIO DE LAS CIUDADES CAPITALES DE COLOMBIA CONECTADAS A LA RED CARRETERA E HIPSOMETRÍA

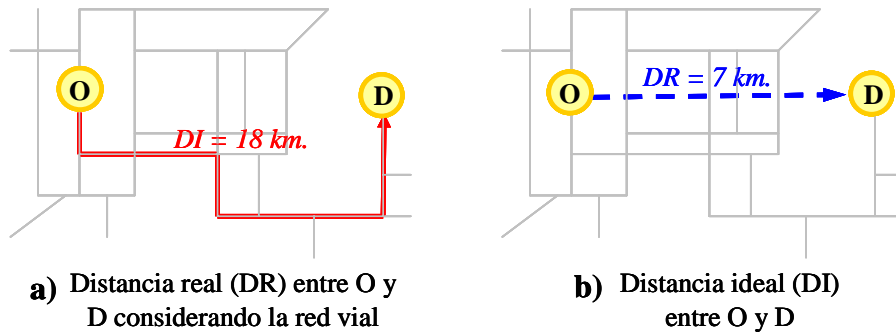


Fuente: información de INFOVIAS, DANE y ESRI.

ÍNDICE DE RODEO

También se le conoce como factor de ruta, y sirve para determinar para un par de localizaciones Origen-Destino la relación existente entre la distancia real (figura 22 a) sobre la red y la distancia ideal o en línea recta (figura 22 b). Aquellos valores resultantes más cercanos a 1 serán los mejores pues indican una trayectoria con pocas desviaciones.

FIGURA 22. DISTANCIA REAL E IDEAL



El índice de rodeo (IR) se calcula con:

$$IR_{OD} = \frac{DR_{OD}}{DI_{OD}}$$

Donde:

DR_{OD} Distancia Real entre O y D

DI_{OD} Distancia Ideal entre O y D

IR_{OD} Índice de Rodeo entre O y D

En el ejemplo anterior, el IR es igual a: $IR_{O-D} = \frac{18}{7} = 2.57$

Este índice también puede calcularse en la modalidad de problema tipo 1 origen, múltiples destinos (fig. 23). El esquema conceptual del análisis es:

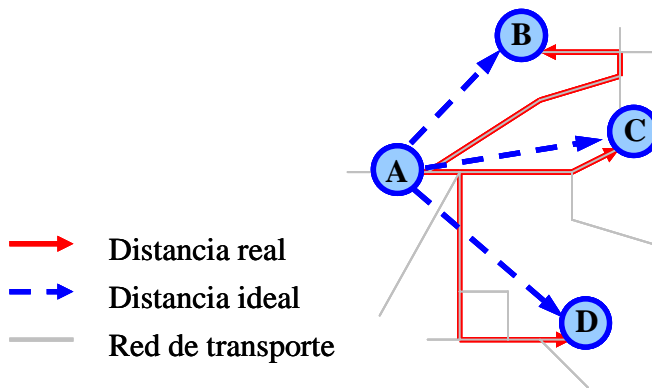


Fig. 23 En este caso, la ecuación

es:

$$IR_A = \frac{(DR_{AB}) + (DR_{AC}) + (DR_{AD})}{(DI_{AB}) + (DI_{AC}) + (DI_{AD})}$$

Simplificando:

$$IR_i = \frac{\sum_{j=1}^n DR_{ij}}{\sum_{j=1}^n DI_{ij}}$$

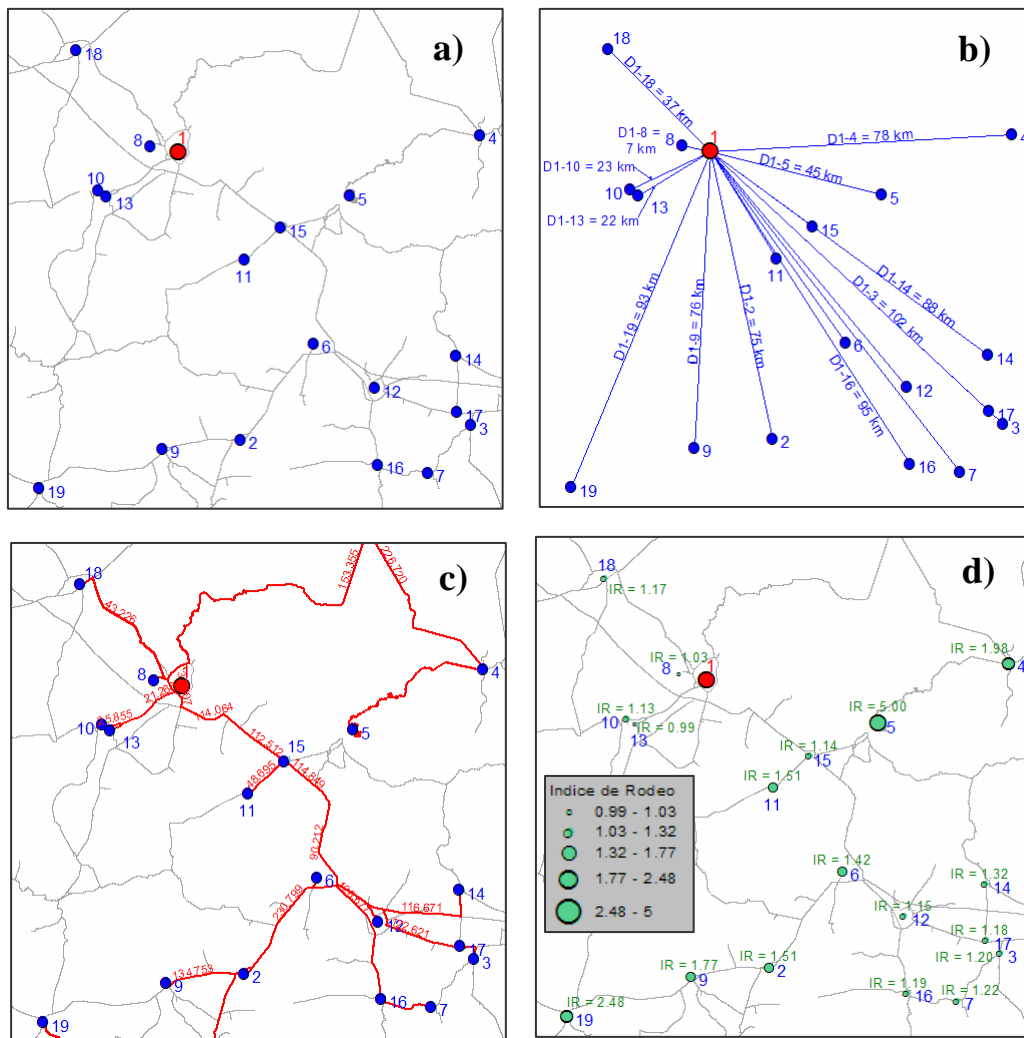
Entradas:

- Cobertura puntual de los orígenes y destinos
- Red de transporte con los atributos de impedancia y restricciones

Procedimiento:

- La distancia real puede calcularse como un problema de ruta óptima 1 a 1.
- Para la distancia ideal puede emplearse la herramienta de diagramas spider (fig. 24)
- La ecuación puede ser resuelta directamente en el SIG o con el apoyo de una hoja de cálculo.

FIG. 24 PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RODEO PARA UN SISTEMA DE LOCALIDADES CONECTADAS A LA RED CARRETERA.



Fuente: Figuras elaboradas por los autores

En la figura 24, a) muestra el conjunto de información requerido para el análisis: la red de transporte y el conjunto de localizaciones, el nodo rojo indica el origen y los nodos azules los destinos. La figura b) muestra las distancias ideales calculadas

con el algoritmo de diagramas spider, que consiste en las distancias en línea recta a partir del nodo de origen hacia los nodos destino. En la figura c) se muestran las distancias reales mediante el cálculo de las rutas óptimas (en rojo) para el problema “uno a muchos”. La figura d) muestra el índice de rodeo para cada localización con respecto al nodo de origen 1 con un método cartográfico de representación de símbolo graduado.

EL MÉTODO DE TIEMPOS MEDIOS

Con el objetivo de conocer el grado de articulación existente entre las localidades mexicanas con más de 15.000 habitantes (507 poblaciones) y el sistema urbano nacional (SUN representado por 117 ciudades) se aplicó el método de Tiempo Medio de recorrido que se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

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

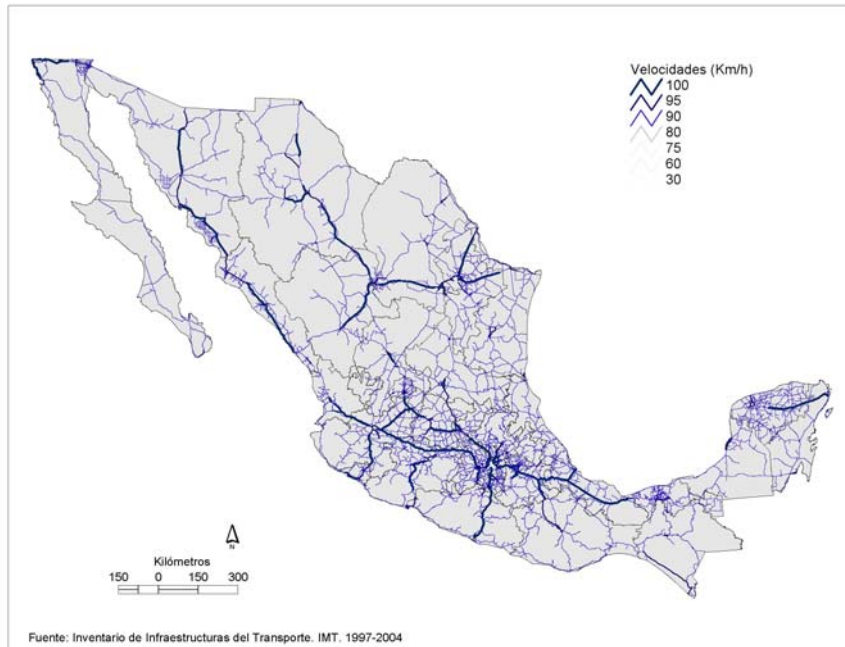
Donde: TM es el Tiempo Medio, t_{ij} es el tiempo de desplazamiento desde una localidad i a cada una de las ciudades j que forman el sistema urbano nacional y N es el número de ciudades que forman el sistema urbano nacional.

Para su aplicación se introdujeron al SIG los siguientes insumos

- La capa de puntos con las localidades urbanas y las correspondientes al SUN del Censo General de Población y Vivienda (INEGI, 2000) para las que se dispone además de información socio-demográfica básica.
- La capa de líneas representada por la red de carreteras del Inventario de Infraestructura de Transporte 1997-2004 del Instituto Mexicano del Transporte (Tabla 1).

Gracias a que se contó con velocidades promedio para cada arco de la red, fue posible elaborar el Modelo de Velocidades de Recorrido de la República Mexicana (Fig. 25) que por sí sólo permite identificar que México tiene tres estructuras regionales de circulación bien diferenciadas: 1) norte, 2) centro y 3) sur. Además se distingue que a cada una de ellas se agregan caminos de menor velocidad de circulación, como se muestra a continuación.

Fig. 25 ESTRUCTURAS REGIONALES DE CIRCULACIÓN DE LA REPUBLICA MEXICANA CON BASE EN LAS VELOCIDADES DE RECORRIDO



Fuente: Modelo elaborado con base en la información del IMT, México, 2004.

Con la aplicación de la fórmula del Tiempo Medio de recorrido se generó el siguiente modelo cartográfico (fig. 26) en el que se aprecian en los colores más claros las ciudades que registran promedios de articulación más bajos al SUN: las ciudades que se encuentran localizadas principalmente en el centro del país (debido a la forma del territorio y la estructura radio concéntrica de la red vial)



Al realizar la interpolación de los tiempos de recorrido, en la siguiente figura, se aprecian con claridad las áreas que se encuentran mejor articuladas al SUN y por lo tanto las que tienen más ventajas para la localización de ciertas actividades productivas y de servicios

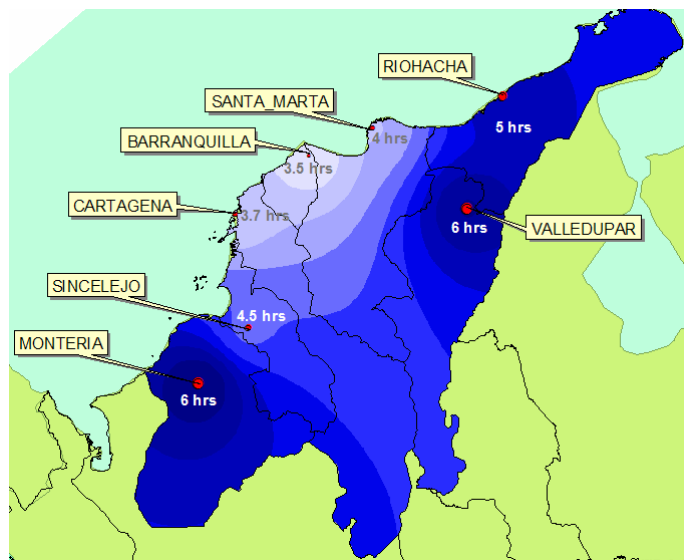
Este mismo ejercicio se puede aplicar ponderando el tiempo medio de recorrido en función del tamaño de población o de la oferta de empleo, o de cualquier otra característica socioeconómica que requiera utilizar. Para esta aplicación la expresión matemática es la siguiente:

Tiempo Medio Ponderado (TMP) $TMP = \frac{\sum_{ij} (T_{ij} \cdot M_j)}{\sum M_j}$

Donde: Donde: M_j es la población de cada una de las ciudades que forman el sistema urbano nacional y $\sum M_j$ es la población total del sistema urbano nacional.

Este procedimiento se puede aplicar considerando un conjunto de relaciones (como es la articulación entre un conjunto de ciudades) o bien a partir de un nodo o ciudad como en el siguiente ejemplo en el que se calcularon los tiempos medios ficticios a partir de las principales ciudades de la zona caribe de Colombia generándose el siguiente modelo cartográfico (figura 27).

Fig. 27 TIEMPOS MEDIOS DE RECORRIDO CALCULADOS DESDE BARRANQUILLA, COLOMBIA



Modelo elaborado por los autores

Conclusiones

A pesar de que numerosos especialistas (economistas, ingenieros, urbanistas y geógrafos) reconocen la importante incidencia de los sistemas de transporte en la estructura, organización y funcionamiento del país, es notable la falta de estudios sobre este sector en los más de veinte Programas Estatales (y regionales) del Ordenamiento Regional (PEOT's) que se han elaborado en México desde principios de este siglo. Incluso se llegan a cuestionar frecuentemente los estudios que centran su atención en la accesibilidad física (determinada básicamente por la variable sintética distancia/tiempo) aduciendo que lo importante es la capacidad de desplazamiento de las personas relacionado con la disponibilidad de los servicios de transporte, soslayando que estas dos formas de medir la accesibilidad son complementarias antes que excluyentes.

Por esta razón nos parece importante demostrar que el uso de los indicadores de accesibilidad empleados en este trabajo (incluso los más simples como los que miden la densidad vial) resultan de gran importancia para conocer los territorios, las poblaciones y el número de habitantes que se encuentran bien, regular o mal articulados a través del modo de transporte más importante en nuestro país, el carretero o también denominado autotransporte. Los estudios y modelos cartográficos realizados aportan conocimiento básico y aplicado para la planeación del transporte en México, pero también para estudiar y resolver numerosos problemas urbano, rurales y regionales vinculados directa o indirectamente a este sector, por ejemplo los relacionados con la competitividad de ciudades, regiones o corredores, la calidad de vida de nuestras ciudades y los crecientes e importantes niveles de seguridad o mejor dicho de inseguridad vial que registran nuestras carreteras y calles.

El uso de los indicadores que se mostraron en la tabla 1 nos han permitido no sólo avanzar académicamente en el conocimiento teórico de construcción y apropiación territorial de nuestro país, sino también demostrar la utilidad social y económica del conocimiento geográfico al participar bajo demanda de instituciones del sector público y privado en importantes proyectos, tales como:

El estudio para la Descentralización de los servicios aéreos de pasajeros del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México estudio que apoyó el inicio de las actividades del Aeropuerto Internacional de la ciudad de Toluca, cuyo éxito ha rebasado las expectativas planteadas en la investigación.

La elaboración de un sistema de información para la reordenación de las rutas de transporte público que alimentarán al Tren Suburbano, sistema que además de su propósito original ha permitido identificar corredores de transporte colectivo de igual o mayor importancia que el considerado para esta obra que se espera inicie sus actividades antes de que termine el 2007.

La generación de un sistema de información geográfico para la prevención de accidentes de tránsito en la ciudad de México, sistema que se encuentra en

proceso y que contendrá tres módulos para su operación; el de diagnóstico, el de pronóstico y el más importante quizá el de prevención.

También se han elaborado modelos cartográficos científicos que se presentarán con la publicación del Nuevo Atlas de México y que muestran por primera vez las áreas de servicio de nuestro sistema urbano y metropolitano, así como las correspondientes al sistema portuario y aeroportuario y las nuevas estructuras territoriales que se están desarrollando con la reestructuración de todo el sistema de transporte a partir de mediados de los años ochenta que introdujo el modelo neoliberal.

Por supuesto los SIG nos facilitan el uso de grandes volúmenes de información, su visualización y representación cartográfica en tiempos relativamente cortos, sin embargo para trascender de lo que es un inventario de información y la generación del conocimiento para la toma de decisiones, se requiere de la participación de especialistas que conozcan y valoren la teoría y práctica del análisis espacial.

Bibliografía

Burrough, P.A. and McDonell, R.A. (1998) Principles of Geographic Information Systems, Ch.7, pp.180-181

Chou, Y.H. (1997) Exploring Spatial Analysis in Geographic Information Systems, Ch.7, pp. 215-264

Dijkstra, E. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. En: Numerische Mathematik 1, 269-271.

Dolan, A. and Aldous, J. (1993) Introduction to Networks and Algorithms, Ch. 7, Ch. 8, Ch 18

Douglas, D.H. (1994) Least-cost Path in GIS Using an Accumulated Cost Surface and Slope-lines, Cartographica, vol.31, no. 3, pp. 37-51

García Palomares, J.C. (2000) Estudios de Construcción y Transportes. No. 88. Departamento de Geografía Humana, Universidad Complutense de Madrid. Ministerio de Fomento.

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; Volúmen I: "Locational Models" (298 páginas) y Volúmen II: "Locational Methods" (346 páginas).] http://www.ggy.bris.ac.uk/staff/personal/PeterHaggett/haggett_publications.html

Husdal, J., Sandvik, A. and Klingsheim, A. (1998), PloGIS – et verktøy i forvaltning av bilpark og planlegging av kjørerute (Norwegian, English: PloGIS - a tool in car pool management and route planning), Coursework submitted in fulfillment of the one-year undergraduate study in GIS, Telemark College, Norway

Jones, C. (1998) Geographical Information Systems and Computer Cartography, Ch. 13, pp. 225-230

Laurini, R. and Thompson, D. (1992) Fundamentals of Spatial Information Systems, Ch. 5, pp.175-197 and Ch. 8, pp. 310-312

Lombard, K. and Church, R.L. (1993) The Gateway Shortest Path Problem: Generating Alternative Routes for a Corridor Routing Problem, Geographical Systems, vol. 1, pp. 25-45

Lupien, A.E., Moreland, W.H. and Dangermond, J. (1987). Network analysis in geographic information systems. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 53, no. 10, pp.1417-1421

Mainguenaud, M. (1995) Modelling the network component of geographical information systems, *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 575-593

Van Eck, J.R. and De Jong, T. (1990), Adapting datastructures and algorithms for faster transport network computations, *Proceedings of the 4th int. symposium on spatial data handling*, vol.1, pp. 295-304

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

Thinkspace Inc./ MFworks (1999) How do I Find the Cheapest Route, excerpt from the MFworks' Help Menu

Zhou Q., Yang X. and Melville M. D. (1996) A GIS Network Model for Sugarcane Field Drainage Simulation, in *Proceedings of 8th Australasian Remote Sensing Conference*, 25-29 March, Canberra, Vol. 2, pp 366-372.

Páginas web:

The Geography of Transport Systems
<http://people.hofstra.edu/geotrans/>

Geography of Transportation
<http://faculty.washington.edu/krumme/transport/transport.html>

Hypergeo
<http://www.hypergeo.eu/sommaire.php3>

<http://www.husdal.com/mscgis/network.htm>