

## UNA MIRADA AL ANÁLISIS DE REDES DE TRANSPORTE EN CUBA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS DATOS

### A GLANCE AT THE TRANSPORTATION NETWORK ANALYSIS IN CUBA FROM THE DATA POINT OF VIEW

**Eduardo Sánchez-Ansola, Ing.**

*Facultad de Ingeniería Informática  
Instituto Superior Politécnico  
José Antonio Echeverría  
La Habana, Cuba  
esancheza@ceis.cujae.edu.cu*

**Laura Sánchez-Jiménez, Ing.**

*Facultad de Ingeniería Informática  
Instituto Superior Politécnico  
José Antonio Echeverría  
La Habana, Cuba  
lsanchez@ceis.cujae.edu.cu*

**Carlos José de  
Armas-García, Ing.**

*Complejo de Investigaciones  
Tecnológicas Integradas  
Instituto Superior Politécnico  
José Antonio Echeverría  
La Habana, Cuba  
cjdearmas59@gmail.com*

(Recibido el 20-04-2013. Aprobado el 16-06-2013)

**Resumen.** En la actualidad, la mayoría de las actividades de la sociedad humana se encuentran en un proceso de informatización. Servicios públicos tales como: hospitales, cuerpos de bomberos, policía, empresas de transporte, entre otros, pueden usar estos procesos para mejorar la calidad de los servicios que brindan. Entre las principales herramientas que soportan la informatización de la sociedad se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE), que apoyan la toma de decisiones en la solución de diversos problemas actuales, a partir de la manipulación de datos espaciales. Países en vías de desarrollo, como Cuba, no están exentos de la informatización de su sociedad. Este artículo presenta un estudio de los datos y herramientas actuales para el uso del análisis de redes viales o de transporte en Cuba. El uso de estos permitiría mejorar los servicios generales de transportación por vía terrestre en las ciudades cubanas, logrando un significativo ahorro de combustible. El resultado más importante obtenido en este trabajo es que el uso de los datos de redes de transporte actuales de Cuba, arroja similares resultados en todas las herramientas analizadas, siendo factible el uso de cualquiera de estas, según el contexto donde se deseen utilizar.

**Palabras clave:** Análisis de redes viales; bases de datos espaciales; camino mínimo; datos espaciales; sistemas información geográfica.

**Abstract.** At present times, most of the activities of human society are in a process of computerization. This means that public services such as hospitals, fire departments, police, transport companies, among others, can use these processes in order to improve the quality of services they provide. Among the main tools that support the computerization of society are Geographic Information Systems (GIS) and Spatial Data Infrastructures (SDI) that support decision making for the solution of several problems using existing spatial data. Developing countries, such as Cuba, are not exempt from the computerization of their society, so this paper presents a study of current data and systems for the use of road or transport network analysis. The use of these data allows improving of general transportation services among Cuban cities, and thus achieving significant fuel savings. Most significant result of this paper is that all analyzed system throws similar result using Cuban transportation network data. Using any of those systems depends on the context of use.

**Keywords:** Network analysis; shortest path; spatial databases; spatial data; geographic information systems

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la humanidad en las últimas décadas, ha ido en ascenso de forma exponencial. Una de las áreas que más rápido evoluciona es la de las Tecnologías de Información y Comunicaciones, extremadamente útil para optimizar procesos, economizar recursos y humanizar el trabajo. Actualmente no se concibe una sociedad o país en la que no exista información digital o datos digitales.

Los datos digitales incluyen todo tipo de información, ya sea de carácter personal, general, privada o pública, por lo que todas las áreas de la sociedad están involucradas en su creación, mantenimiento y uso, y con este último se benefician de disímiles formas. En la actualidad un gran porcentaje de esta información está acompañada por información geográfica o datos espaciales [1] que no son más que un conjunto de elementos que permiten localizar y visualizar, sobre un mapa, cierta información en cualquier lugar del planeta, mediante coordenadas geográficas, eventos, sucesos o fenómenos de interés para una organización, entidad o persona en sentido general [2].

Para la manipulación de los datos espaciales fueron creados los Sistemas de Información Geográfica (SIG), definiéndose estos como: “un potente conjunto de herramientas para recolectar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y presentar datos espaciales procedentes del mundo real” [3]. Sin embargo, una definición más aceptada es la redactada por el NCGIA (*National Centre of Geographic Information and Analysis*): “un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión” [4].

Como puede apreciarse los SIG son herramientas que permiten la creación y manipulación de datos espaciales por cualquier entidad o persona que tenga el conocimiento mínimo necesario para manipularlos, por lo cual se han convertido en instrumentos realmente útiles para apoyar la toma de decisiones en la solución de diferentes problemas de la sociedad. Algunos de estos problemas están relacionados con el transporte y pueden plantearse situaciones como: ¿cuál es la ruta más corta entre la locación A y la locación B?, ¿cuál es el área de servicio de la Estación de Bomberos #1?, ¿cuáles ambulancias pueden responder más rápido a un accidente?, o

¿cómo minimizar el costo de transportación de una flota de vehículos? A cada una de estas situaciones se le puede dar respuesta a través del análisis de redes viales, elemento de mayor impacto de los SIG en la sociedad [1].

Mediante el uso de los diferentes tipos de análisis de redes viales existentes pueden ser resueltas una gran variedad de interrogantes como las vistas anteriormente que, si se plantean del modo adecuado, permiten reducir costos y economizar recursos como el combustible, dedicado a la transportación, o el tiempo de viaje de una persona. Por estas y otras razones el análisis de redes viales se torna una herramienta de gran importancia en muchas ciudades y países del mundo —no excluyendo a países en vías de desarrollo— que serían muy beneficiados a partir de los resultados obtenidos de dicho análisis.

Es importante mencionar que el análisis de las redes de transporte consta de varios elementos fundamentales y que cada uno de estos, puede ser perfeccionado en pos de obtener mejores resultados. Uno de los elementos fundamentales son los datos sobre la red.

Los datos útiles para el análisis de redes de transporte en Cuba son generados por el Grupo Empresarial GEOCUBA, al igual que el resto de los datos espaciales oficiales. Sin embargo, estos datos poseían una estructura que hacía complejo su uso para cualquier tipo de análisis. Actualmente este grupo empresarial se encuentra realizando una reestructuración de los datos geográficos de Cuba, a partir de un modelo de datos que sí incluye todas las características necesarias para realizar distintos análisis espaciales [5].

Además de los datos generados por GEOCUBA, existen otros no oficiales y, por lo tanto, con cierto nivel de incertidumbre sobre su calidad. Este es el caso de los datos distribuidos por el proyecto colaborativo OpenStreetMap (OSM) dedicado a la creación y distribución de datos vectoriales de todo el planeta, incluyendo a Cuba. Estos datos están disponibles en [6].

En los últimos tiempos en Cuba se ha realizado un conjunto de investigaciones y trabajos en la temática del análisis de redes de transporte, haciendo uso de los SIG; sin embargo, en la mayoría de estos trabajos o no se reporta qué datos fueron utilizados o se hace uso de datos no oficiales de Cuba.

Este trabajo está centrado en el análisis de la solución del problema: “¿Cuál es la ruta más corta entre la locación A y la locación B?”; es decir, encontrar el camino mínimo en una red vial a partir de un par de localizaciones geográficas. La solución de este problema no solo brinda una utilidad directa a los usuarios, sino que también puede ser utilizada como datos de entrada o datos iniciales en la solución de otros problemas antes mencionados.

El objetivo de este trabajo consiste en darle respuesta a tres preguntas:

1. ¿Qué características necesitan los datos para poder realizar con ellos un correcto análisis de redes de transporte?
2. ¿Pueden ser utilizados los datos actuales de Cuba para obtener soluciones de calidad?
3. ¿Cuáles herramientas actuales permitirían obtener mejores resultados?

Según la situación descrita anteriormente, el principal aporte de este trabajo es la utilización de los últimos datos espaciales oficiales de Cuba, específicamente de la provincia La Habana, para comprobar su utilidad en la obtención de resultados significativos en el análisis de redes viales, a partir de algunas de las herramientas más utilizadas en la actualidad.

## 2. EL PROBLEMA DEL CAMINO MÍNIMO

En la teoría de grafos, el problema del camino más corto o camino mínimo consiste en encontrar un camino entre dos vértices (o nodos), de tal manera que la suma de los pesos de las aristas que lo constituyen sea mínima [7], [8]. Un ejemplo es encontrar el camino más rápido para ir de una ciudad a otra en un mapa. En este caso, los vértices representan las ciudades y las aristas las carreteras que las unen, cuya ponderación viene dada por el tiempo que se emplea en atravesarlas.

Dado un grafo ponderado (un conjunto  $V$  de vértices, un conjunto  $E$  de aristas y una función de variable real ponderada  $f: E \rightarrow R$ ) y un elemento  $v \in V$ , encuentra un camino  $P$  de  $v$  a  $v' \in V$ , tal que la función (1) es el mínimo entre todos los caminos que conectan  $v$  y  $v'$ :

$$\sum_{p \in P} f(p) \quad (1)$$

Los algoritmos más importantes para resolver este problema son:

Algoritmo de Dijkstra: definido por primera vez por Edsger Dijkstra en 1959 [7]. Este resuelve el problema del camino mínimo entre dos vértices, desde un origen y un único destino [9].

Este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino mínimo desde el vértice origen al vértice destino, el algoritmo se detiene. El algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme [10] y, como tal, no funciona en grafos con aristas de coste negativo. En el siguiente pseudocódigo se describen los pasos que sigue el algoritmo de Dijkstra para encontrar la ruta más corta [11]:

1. Procedure *dijkstra* ( $w, a, z, L$ )
2.  $L(a) := 0$
3. for todos los vértices  $x \neq a$  do
4.  $L(x) := \infty$
5.  $T :=$  conjunto de todos los vértices
6. //  $T$  es el conjunto de vértices cuya distancia
7. // más corta a  $a$  no ha sido determinada
8. while  $z \in T$  do
9. begin
10. elegir  $v \in T$  con  $L(v)$  mínimo
11.  $T := T - \{v\}$
12. for cada  $x \in T$  adyacente a  $v$  do
13.  $L(x) := \min \{L(x), L(v) + w(v,x)\}$
14. end
15. end *dijkstra*

Algoritmo de Búsqueda A\*: presentado por primera vez en 1968 por Peter E. Hart, Nils J. Nilsson y Bertram Raphael [12]. Este algoritmo resuelve el problema del camino mínimo entre un par de vértices, usando una heurística para intentar agilizar la búsqueda [9].

También existen otros algoritmos para resolver el problema del camino mínimo, entre los que se encuentran:

Algoritmo de Bellman - Ford, que resuelve el problema del camino mínimo desde un origen, si la ponderación de las aristas es negativa [13].

Algoritmo de Floyd - Warshall, que resuelve el problema del camino mínimo entre todos los vértices[8], [13], [14].

Algoritmo de Johnson, que resuelve el problema del camino mínimo entre todos los vértices y puede ser más rápido que el de Floyd - Warshall en grafos de baja densidad [14].

Una de las aplicaciones de los algoritmos para encontrar el camino mínimo es encontrar direcciones de forma automática entre localizaciones físicas, tales como direcciones en mapas callejeros.

Si un algoritmo representa una máquina abstracta no determinista como un grafo, donde los vértices describen estados y las aristas posibles transiciones, el algoritmo del camino mínimo se usa para encontrar una secuencia óptima de opciones para llegar a un cierto estado final o para establecer límites más bajos en el tiempo necesario para alcanzar un estado dado. Por ejemplo, si los vértices representan los estados de un rompecabezas, como el Cubo de Rubik, cada arista dirigida corresponde a un simple movimiento o giro. Los algoritmos de camino mínimo se usan para encontrar la solución que utiliza el mínimo número posible de movimientos.

Otras aplicaciones incluyen la Investigación de Operaciones (IO), las instalaciones y facilidad de diseño, la robótica, el transporte y los VLSI (*Very Large Scale Integration*) de diseño.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS PARA EL MODELO

Los datos son la base de todo sistema de información, por tanto los datos espaciales o geo-referenciados son la base de todo Sistema de Información Geográfica y, a su vez, de todos los posibles análisis que puedan ser realizados haciendo uso de estos sistemas. En el caso del análisis de redes de transporte, los datos espaciales son utilizados para conformar un modelo de red vial que debe contener una serie de elementos o atributos imprescindibles para realizar un correcto análisis. Además, un modelo puede ser enriquecido con otros atributos brindando así un mayor valor a cualquier análisis.

#### 3.1 Modelo de red vial

Como se mencionó anteriormente, para realizar un análisis de redes es necesario construir un modelo de red vial en el que a mayor calidad de los datos que lo conforman, mejores sean los resultados obtenidos.

Un modelo de red vial es un grafo que representa la relación de una infraestructura vial a partir de enlaces (segmentos de ejes viales) y nodos (intersecciones entre los ejes) [15]. Por tanto, los elementos fundamentales para la construcción de estos modelos son los datos sobre los ejes viales y sus intersecciones. Sin embargo, normalmente solo se cuenta con la información referente a los segmentos de ejes viales o calles, ya que con ella se puede obtener la información de las intersecciones, a partir de una serie de análisis espaciales.

En la Tabla 1 se muestra un conjunto de datos que representan algunos de los segmentos de ejes viales pertenecientes a la provincia La Habana, con los atributos imprescindibles para la correcta construcción de un modelo de red vial[15], [16]. A partir de estos segmentos, si se construye un modelo de red vial, puede obtenerse una representación como la ilustrada en la Fig. 1.

**Tabla 1. Datos iniciales para la construcción de un modelo de red vial**

Nombre	Sent.	Vel. (km/h)	Tiem. (s)	Dist. (m)	Geometría
Calle 17	Ft	40	12.186	135.4	Poli-línea
Calle 17	Ft	40	8.4186	93.54	Poli-línea
Calle 19	Ft	40	12.105	134.5	Poli-línea
Calle 19	Ft	40	8.5491	94.99	Poli-línea
Calle 21	Ft	40	8.7237	96.93	Poli-línea
Calle 21	Ft	40	12.204	135.6	Poli-línea
Calle C	Ft	40	10.53	117.0	Poli-línea
Calle C	Ft	40	10.548	117.2	Poli-línea
Calle D	Ft	40	10.458	116.2	Poli-línea
Calle D	Ft	40	10.53	117.0	Poli-línea
Calle E	Ft	40	10.413	115.7	Poli-línea
Calle E	Ft	40	10.539	117.1	Poli-línea

A continuación se presenta una breve descripción de los atributos mostrados:

- **Nombre:** identifica al eje vial y luego de realizado un análisis es utilizado para brindar orientaciones de navegación.
- **Sentido (Sent.):** describe el sentido o dirección del eje vial. Sus posibles valores son: ambos sentidos (B), un sentido (Ft) o sin circulación (N). Es un atributo de carácter obligatorio en cualquier modelo de red vial, sin el cual no pudiera realizarse ningún tipo de análisis.
- **Velocidad máxima permitida (Vel.):** este atributo describe la velocidad máxima promedio con la cual se puede circular por el segmento de vía. Los valores de cada eje vial se otorgan a partir del análisis de: estado técnico y categoría de la vía, pero puede ser enriquecido teniendo en cuenta datos como semáforos y señales de tránsito. Usualmente se mide en kilómetros por hora (km/h).
- **Tiempo de recorrido (Tiem.):** este atributo está referido al tiempo que tarda un vehículo en recorrer el segmento de calle a la velocidad máxima promedio. Al ser, en sentido general, longitudes pequeñas, este atributo se mide en segundos (s).
- **Longitud del segmento (Dist.):** describe la longitud del segmento vial y es obtenido a partir de la geometría de los datos. Este atributo puede ser enriquecido agregando a la geometría de los datos, una coordenada "Z"; es decir, un dato de altura con el cual las distancias pudieran tener un carácter más realista y los tiempos, en un sentido y otro, fueran diferentes. Es otro atributo imprescindible para realizar cualquier análisis, conjuntamente con el sentido de circulación. Se mide en metros (m).

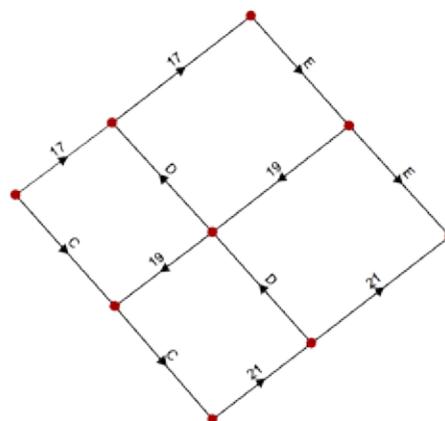


Fig. 1. Representación del modelo correspondiente a los datos de la Tabla 1.

Además de los atributos presentados pueden existir otros como la Jerarquía y la Categoría que permiten enriquecer el modelo final. En [16] y [17] puede apreciarse una posible relación entre estos atributos.

- **Geometría:** es el atributo más importante en cualquier dato espacial, pues define su posición geográfica y su forma. En una red vial la geometría, generalmente, consiste en poli-líneas.

Como ya se mencionó, la Figura 1 muestra una representación del modelo de red vial construido a partir de los datos de la Tabla 1, los puntos rojos representan las intersecciones entre los segmentos (nodos). La información de estos nodos (identificador y geometría) es almacenada en una tabla, según sea el formato utilizado.

Además de los atributos presentados pueden existir otros como la Jerarquía y la Categoría que permiten enriquecer el modelo final. En [16] y [17] puede apreciarse una posible relación entre estos atributos.

#### 4. HERRAMIENTAS PARA ANÁLISIS DE DATOS

Si bien es cierto que los datos están entre los elementos más importantes en los SIG y por tanto para el análisis de redes viales, las herramientas SIG también juegan un papel fundamental. Es por ello que se presenta una breve comparación entre algunas de las herramientas actuales capaces de almacenar in

**Tabla 2. Características de algunas herramientas para almacenar datos y realizar análisis de redes.**

	Oracle	PostgreSQL	SQLite	ArcGIS
Tipo	Base de Datos	Base de Datos	Base de Datos	SIG
Soporte de datos de red	Si	Si	Si	Si
Licencia libre	No	Si	Si	No
Tipos de análisis de redes	Camino mínimo, TSP	Camino mínimo, TSP, etc.	Camino mínimo	Camino mínimo, VRP, etc.
Manejo visual de datos	No	No	Si	Si
Asistente para modelos de red	Si	No	Si	Si
Módulo de redes	Network Analysis API	pgRouting	Virtual-Network	Network Analyst Extention
Algoritmos para camino mínimo	Dijkstra	Dijkstra, A*	Dijkstra, A*	Dijkstra
Servicios de rutas	Si OpenLS	No	No	Si Propio

formación espacial sobre redes viales, construir sus propios modelos de red y realizar algún análisis espacial sobre estos. En [18], [19] y [20] se presentan estudios comparativos entre los Sistemas de Gestión de Bases de Datos con características espaciales más importantes en la actualidad; sin embargo, no se hace referencia a sus características para realizar análisis de redes viales.

De esta forma, en la Tabla 2, se muestra la comparación mencionada. Esta tabla fue construida a partir de la información reflejada en [15], [17], [21, 22], [23], [24], [25], [26], [27], [28] y [29].

## 5. RESULTADOS PUBLICADOS, VINCULADOS AL ANÁLISIS DE REDES VIALES EN CUBA

Como se ha podido observar en las secciones anteriores, el análisis de redes viales ha ido en evolución en los últimos tiempos, tanto desde el punto de vista de los problemas que pueden ser solucionados, como desde el punto de vista de los sistemas informáticos y los algoritmos utilizados para resolverlos. En Cuba también se han venido realizando investi-

gaciones y se han obtenido resultados relacionados con el análisis de redes viales. A continuación se brinda una breve descripción de algunos de estos.

### 5.1 Sistema de análisis de redes viales en la provincia Villa Clara

Este sistema, desarrollado por especialistas de la Unidad de Desarrollo Científico-Tecnológico de GEOCUBA Villa Clara-Sancti Spíritus, se basa en la creación de una herramienta para el cálculo de distancias, en cuanto a ordenar, trazar estrategias de recorridos hacia múltiples destinos, planificar rutas, obtener áreas de servicios y realizar grandes cantidades de cálculos de distancia en poco tiempo [16]. A pesar de que no se menciona con qué herramienta o base de datos se ha creado este sistema, por su descripción se evidencia que ha sido utilizada la aplicación *ArcGIS Desktop*, conjuntamente con su modelo de redes viales *Network DataSet*. Igualmente, no se hace referencia a qué datos son los manejados para la utilización de la herramienta presentada. Según los resultados mostrados en [16], con este sistema se lograron obtener soluciones a problemas del tipo: ¿cuál es la ruta más corta entre la locación A y la locación B?, o ¿cuáles ambulancias pueden responder más rápido a un accidente?, y construir, además, tablas de distancias entre diferentes locaciones de la provincia Villa Clara.

### 5.2 Análisis de redes viales en ArcGIS

Tesis de grado de la Facultad de Ingeniería Informática del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, dedicada a la descripción y construcción de un servicio de análisis de redes viales a partir de la tecnología *ArcGIS*. Además de la creación del servicio que se deseaba implementar, se obtuvo como resultado una aplicación capaz de, a partir del uso del servicio —en interacción con otros servicios geoespaciales (*Geocodificación y Servicio de Objetos Geográficos, WFS*)—, obtener rutas óptimas en la provincia La Habana, teniendo en cuenta la distancia a recorrer o el tiempo requerido para un recorrido. Para la construcción del servicio fue utilizada, como base, la cartografía digital de los ejes viales de la provincia La Habana, suministrada por el Grupo Empresarial GEOCUBA [30]. Esta cartografía constituye una versión inicial de la utilizada en el presente trabajo.

### 5.3 Servicio web de enrutamiento de vehículos

Propuesta realizada por especialistas de la empresa Cartografía y Soluciones Geomáticas de Cuba, para darle solución al Problema de Enrutamiento de Vehículos, conocido comúnmente como VRP (*Vehicle Routing Problem*). El VRP constituye un problema NP-Completo, por lo cual las soluciones encontradas generalmente serán aproximadas y para hallarlas son necesarios algoritmos complejos. Los autores de esta propuesta dividen este problema en tres sub-problemas de menor complejidad, siendo el primero de ellos la estimación del camino más corto entre cualquier par de puntos geográficos conectados a la red de carreteras y caminos de Cuba. Para darle solución a este sub-problema emplean el algoritmo A\* que se encuentra en el módulo *pgRouting* de la base de datos espacial *PostGIS* [31]. Los autores presentan como uno de sus principales resultados la capacidad de obtener el camino de costo mínimo entre cualquier par de puntos geográficos de la red vial cubana, teniendo en cuenta el tiempo de recorrido o la distancia a transitar. Los autores plantean hacer uso de datos ofrecidos por GEOCUBA; sin embargo, no se encuentra ninguna descripción de las características de estos o su calidad para resolver los problemas planteados. Igualmente para las pruebas realizadas, fueron utilizados los datos de una de las instancias encontradas en la literatura (att48 propuesto por Rinaldi y Yarrow/Araque), sin relación alguna con Cuba.

### 5.4 Servicio provincial de rutas para la IDERC

Es un servicio desarrollado por especialistas de la delegación Oriente Sur de la empresa GEOCUBA. Simultáneamente con este servicio se crearon dos aplicaciones SIG para interactuar con el mismo, las cuales se encuentran publicadas en el Geoportal de la provincia Santiago de Cuba, en conjunto con otros servicios espaciales basados en la localización [32]. Los autores plantean que en la creación del servicio fueron utilizadas las variantes del algoritmo de Dijkstra que pueden ser encontradas en el módulo *pgRouting* de la base de datos espacial *PostGIS*. Los autores expresan como una de las ventajas de la creación del servicio y las aplicaciones, la generalización a otras provincias del país, siempre y cuando la cartografía cumpla con las condiciones topológicas necesarias. No se plantea implícitamente qué datos fueron utilizados, sin embargo puede intuirse que fueron utilizados datos generados por GEOCUBA y estos fueron modificados por los autores del trabajo.

Modelo basado en grafos reducidos para la representación y análisis de redes en Sistemas de Información Geoespacial

Tesis de doctorado presentada por un profesor de la Universidad de Ciencias Informáticas (UCI). El objetivo de esta es desarrollar un modelo para la representación y análisis de redes, basado en grafos, que permita entre otras cosas, la búsqueda escalable y eficiente de caminos óptimos [8]. El autor realiza un estudio de las diferentes herramientas, sistemas y algoritmos existentes en la actualidad para encontrar rutas óptimas, haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica. Sin embargo, el trabajo está centrado en el desarrollo de un algoritmo que sea capaz de encontrar una ruta óptima en grafos de gran escala en un tiempo adecuado. El autor demuestra, con los resultados de las pruebas realizadas, la validez del algoritmo desarrollado comparándolo con algunos de los algoritmos más utilizados (Dijkstra y A\*) y, además, describe la aplicación de dicho algoritmo en un complemento creado para la herramienta SIG Quantum GIS (QGIS). Las pruebas descritas son realizadas sobre los datos propuestos en [33], [34], los cuales hacen referencia a ciudades o condados de América del Norte.

### 5.6 Reducción del costo de transportación en las Series Nacionales de Béisbol, empleando metaheurísticas

Solución creada por profesores del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), para lograr la reducción de costos en la transportación en la Serie Nacional de Béisbol (SNB) [35]. Los autores hacen uso de las *metaheurísticas* para darle solución al problema planteado, definido como Problema de la Transportación en un Torneo (en inglés: *Travelling Tournament Problem, TTP*) y lograr minimizar la distancia total recorrida por los equipos. Es importante destacar que para darle solución a este problema fue necesario contar con una matriz cuadrada de orden  $n$  con las distancias entre las sedes de los equipos. La obtención de esta matriz puede ser resuelta a partir de un problema del tipo: *¿cuáles ambulancias pueden responder más rápido a un accidente?*, que se soluciona resolviendo un conjunto de problemas para encontrar el camino mínimo. Para obtener la matriz fue usado el sistema *ArcGIS Desktop*, conjuntamente con su modelo de redes viales *Network DataSet*, construido a partir de los datos referentes a las autopistas y carreteras interprovinciales principales del país. Los resultados obtenidos muestran que

Tabla 3. Características de los datos de ejes viales de La Habana.

Sentido de circulación	Cantidad de segmentos	% del total
Ambos sentidos	45979	78.68
Acceso restringido	69	0.11
Un sentido	12383	21.19
Bien definido	6999	11.97
Indefinido	5384	9.21
Todos	58431	100

si se aplica la solución brindada por los autores, es posible lograr un ahorro entre un 15% y un 30% de la distancia total recorrida. Se debe mencionar que los datos utilizados por los autores forman parte de los utilizados en el presente trabajo.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ENCONTRAR LA RUTA MÁS CORTA CON LOS DATOS ACTUALES DE LA HABANA

En las secciones anteriores se ha brindado una descripción de las características de los datos espaciales que conforman una red vial, así como una tabla comparativa con algunas de las herramientas SIG capaces de almacenar y realizar análisis sobre estos tipos de redes; además, se exponen los últimos avances alcanzados en el análisis de redes viales en Cuba. A continuación se exponen algunos resultados obtenidos luego de resolver el problema del camino mínimo, a partir del uso de algunas de las herramientas presentadas anteriormente. Para realizar estos análisis fueron utilizados, como datos iniciales, los segmentos de la red vial de la provincia La Habana. Las características de estos datos pueden ser apreciadas en la Tabla 3 y la distribución espacial de los mismos puede ser observada en la Fig. 2. Además, el uso de estos datos y no los de otra provincia o ciudad del país, está determinado por la cantidad de ejes viales existentes en La Habana, lo que permitiría inferir que los resultados de las pruebas realizadas en otras provincias o ciudades tuvieran un comportamiento similar.

Es importante mencionar que actualmente la cartografía digital existente sobre los ejes viales de las ciudades cubanas, no cuenta con todas las características necesarias para realizar un análisis de alta



Fig. 2. Representación geográfica de los datos iniciales de la Tabla 3.

calidad. Estos datos son generados por el Grupo Empresarial GEOCUBA, que es la encargada de crear y procesar todos los datos geográficos de Cuba. Actualmente este grupo se encuentra realizando una reestructuración de los datos geográficos de Cuba, a partir de un modelo de datos que sí incluye todas las características necesarias para el análisis de redes viales [5].

Es por este motivo que, como se puede apreciar en la Tabla 3, existe alrededor de un 10% de los segmentos de ejes viales que no tienen bien definido el sentido de circulación, estos datos fueron corregidos por los autores del trabajo.

Para la obtención de los resultados que aquí se presentan se siguieron los siguientes pasos:

1. Construir el modelo de red vial en cada una de las herramientas sobre las que realizar el análisis.
2. Obtener una pequeña muestra de caminos mínimos en cada herramienta a partir de 5 pares de vértices o nodos (Tabla 4).
3. Basado en los resultados obtenidos en el paso 2, realizar un muestreo aleatorio con un tamaño de muestra de 100 pares de nodos y repetir el proceso 10 veces en cada herramienta.
4. Analizar los resultados obtenidos.

En primera instancia, es importante mencionar que luego de la generación de los modelos de red, según las características de cada herramienta, se crearon

**Tabla 4. Resultado inicial del análisis en diferentes herramientas.**

Cantidad de Nodos/Costo (m)				
ArcGIS	ArcGIS		SpatialLite	SpatialLite
Any	End	Oracle	Dijkstra	A*
Vertex	Vertex			
41893	41747	41742	41729	41729
2307.3	2307.3	2307.28	2307.28	2307.28
5561.7	5561.7	5561.61	5561.61	5561.61
13276.3	13276.3	13276.24	13276.24	13276.24
12853.9	12853.9	12853.78	12853.78	12853.78
25482.7	25482.7	25482.5	25482.50	25482.50

diferencias entre cada modelo, principalmente en la cantidad de vértices o nodos de la red, como puede observarse en la fila señalada de la Tabla 4. Esto se debe a que en el modelo de SpatialLite no se soportan ejes viales cerrados, es decir, que presenten el mismo nodo inicial y final y en el caso de ArcGIS, cada modelo depende del tipo de conexión que se le dé a los ejes, existiendo mayor cantidad en el modelo Any Vertex. Igualmente se debe hacer notar que la generación en ArcGIS y SpatialLite se realizó a través de un asistente, mientras que en Oracle esta fue realizada a mano.

Luego de concluido el paso 2, se obtuvieron los caminos mínimos entre 5 pares de nodos, las distancias resultantes se reflejan en la Tabla 4, donde se puede apreciar que no existe prácticamente diferencia entre las distancias obtenidas, solamente en los casos de ArcGIS. Esto se debe a que para realizar los análisis en esta herramienta, fue necesario introducir los vértices iniciales y finales a través de una interfaz SIG, lo que generó una diferencia de algunos centímetros (cm) entre el nodo de la red y el insertado manualmente.

En la Fig. 3 puede observarse la ubicación geográfica de las rutas obtenidas en el paso 2, identificando en colores diferentes cada una de ellas.

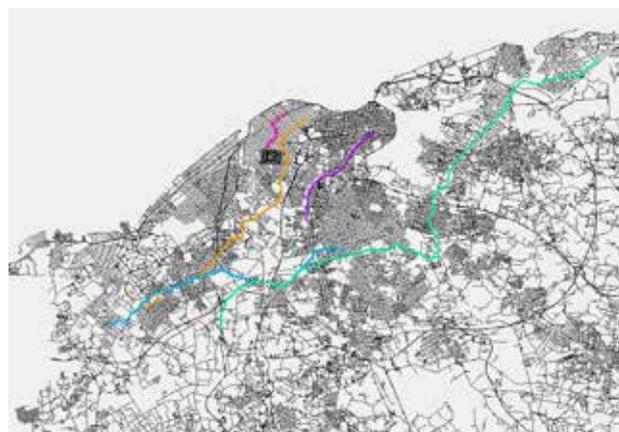


Fig. 3. Representación gráfica de los caminos mínimos mostrados en la Tabla 4.

Luego de obtener los resultados iniciales mostrados en la Tabla 4, se creó un programa en C# para obtener de forma automática nuevos resultados, según lo planteado en el paso 3. Este programa sigue las líneas generales del siguiente pseudocódigo:

1. nodes[]; // array of id nodes in network
2. beginNodes[];
3. endNodes[];
4. i = 0; j = 0, k = 0;
5. while i < 100 do
6. beginN = random(); // random id of node
7. f beginN is on nodes[]
8. beginNodes[i] = beginN;
9. i = i + 1;
10. while j < 100 do
11. endN = random(); // random id of node
12. if endN is on nodes[]
13. endNodes[j] = endN;
14. j = j + 1;
15. for k to 100
16. oracleSP(beginNodes[k], endNodes[k]);

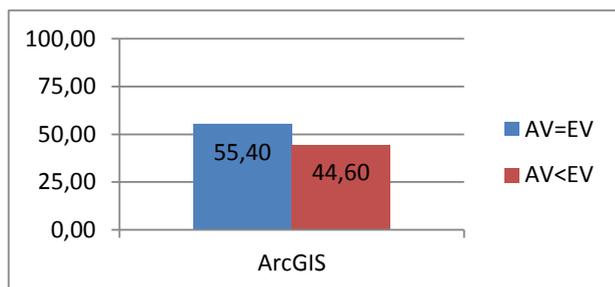


Fig. 4. Relación porcentual existente entre los resultados obtenidos con los diferentes modelos de ArcGIS.

- 17. spatiaLiteDSP(beginNodes[k], endNodes[k]);
- 18. spatiaLiteASP(beginNodes[k], endNodes[k]);
- 19. arcGISAVSP(beginNodes[k], endNodes[k]);
- 20. arcGISEVSP(beginNodes[k], endNodes[k]);

Si bien los resultados mostrados en la Tabla 4 no reflejan diferencias significativas entre los análisis realizados, es de esperar que con un tamaño de muestra cien veces mayor y totalmente aleatoria, sí se generen diferencias apreciables, sobre todo entre los dos modelos de ArcGIS y entre los modelos de SpatialLite y de Oracle con el de ArcGIS. Igualmente se esperaba alguna diferencia en los resultados, según la utilización de los algoritmos **Dijkstra y A\***, en SpatialLite, atendiendo a lo expresado en la bibliografía consultada.

El análisis de los resultados se dividió en cuatro partes fundamentales: comparar los resultados a partir de los dos modelos de redes de ArcGIS, comparar los resultados a partir de los modelos de similar construcción, pero en las diferentes herramientas (ArcGIS End Vertex, Oracle y SpatialLite), comparar el comportamiento de los dos algoritmos ofrecidos por SpatialLite y, por último, analizar el tiempo de ejecución de cada herramienta. A continuación se muestran estos resultados y su análisis, a partir de gráficas estadísticas.

La Fig. 4 muestra la relación porcentual existente entre los resultados obtenidos con los diferentes modelos de ArcGIS (AV: Any Vertex, EV: End Vertex). Como se puede apreciar los resultados se comportaron de dos formas diferentes: iguales en ambos modelos (55.40%) o ligeramente inferiores en el modelo AV (44.60%), lo que se explica a partir de la existencia de mayor cantidad de vértices en este modelo.

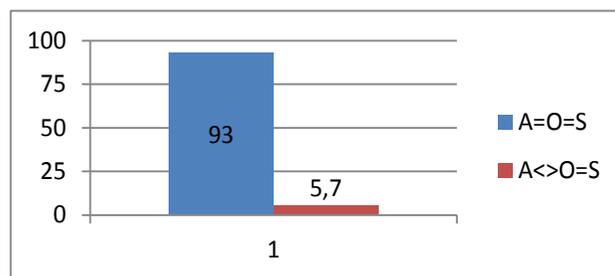


Fig. 5. Relación porcentual existente entre los resultados obtenidos con los modelos generados de forma similar en tres herramientas diferentes.

La Fig. 5 presenta el gráfico de una comparación realizada a partir de las herramientas que permiten construir el modelo de red de forma similar y utilizan el mismo algoritmo (Dijkstra). Este gráfico refleja, esencialmente, el porcentaje de veces que los resultados obtenidos, con cada herramienta, fueron iguales en los tres casos (A=O=S) o iguales entre Oracle y SpatialLite, pero diferentes con ArcGIS (A<>O=S).

Nótese que en el gráfico de la Fig. 5 los porcentajes mostrados no alcanzan el 100%, esto es debido a que sólo un resultado fue diferente entre Oracle y SpatialLite, existiendo una igualdad entre alguno de estos modelos con el de ArcGIS.

Un resultado interesante es la total igualdad entre los resultados obtenidos con el modelo generado en SpatialLite, utilizando los dos algoritmos que soporta.

Otro análisis realizado a los resultados obtenidos se refiere al tiempo de ejecución de cada herramienta para alcanzar la ruta más corta. La Fig. 6 muestra cómo los menores tiempos fueron logrados por los algoritmos de SpatialLite, mientras que ArcGIS y Oracle se comportaron de manera similar. Ha de tenerse en cuenta que los resultados de ArcGIS fueron conseguidos a partir del uso de un servicio web, lo que genera la transmisión de información a través de una red.

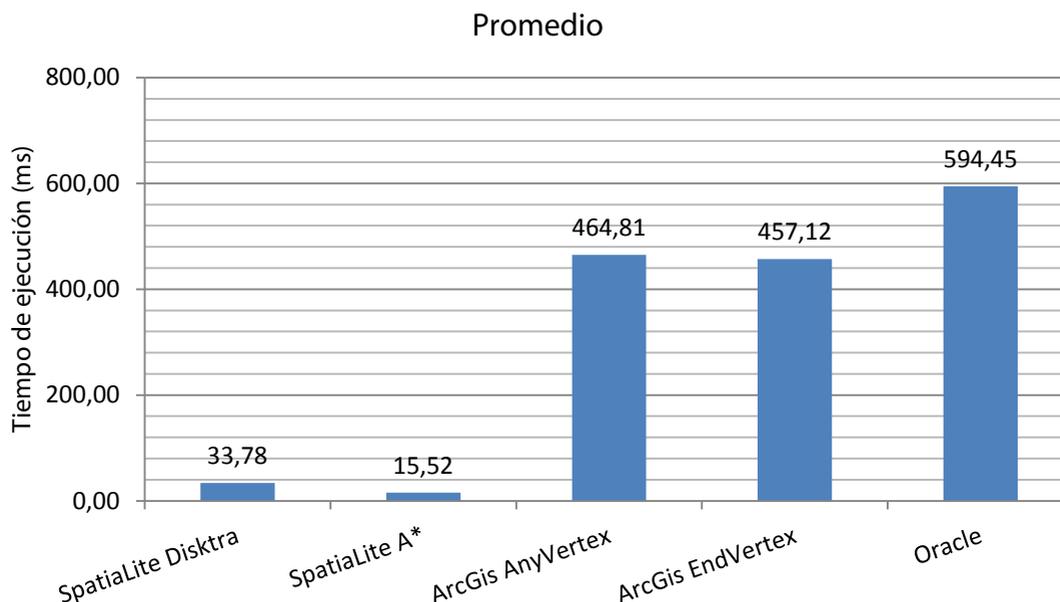


Fig. 6. Tiempo promedio de ejecución, en milisegundos, de las herramientas en la obtención de la ruta más corta.

Es significativo destacar la imposibilidad de asegurar, según la aleatoriedad de los análisis realizados, cuál de las herramientas brinda mejores resultados. Esto se debe a que no se conoce realmente cuál es el camino mínimo entre cualquier par de nodos de la red vial de La Habana, por lo que no existe un óptimo o un mejor resultado para comparar.

Sin embargo, debido a la semejanza de los resultados obtenidos, se puede afirmar que todas las herramientas poseen un comportamiento similar, por lo cual la selección de una de ellas dependerá del entorno donde se desee aplicar. Así, si se desea construir una aplicación sencilla y de fácil manipulación o una aplicación móvil para el cálculo de caminos mínimos, puede utilizarse SpatialLite. Por otra parte si lo que se desea es realizar algún tipo de análisis de forma sencilla, a través de una interfaz SIG, se recomienda ArcGIS. Por último, si lo que se desea es acceder a un servicio web de fácil uso, estándar o no, se recomienda el uso de ArcGIS u Oracle.

## 7. CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se logró identificar que las principales características de los datos espaciales, que representan una red vial para poder resolver el problema de encontrar el camino mínimo,

son: la geometría de los ejes viales, la longitud de los mismos y su sentido de circulación.

Igualmente se mostró que existen varias herramientas SIG capaces de almacenar estos tipos de datos y realizar los análisis correspondientes sobre los mismos, sin necesidad de otras aplicaciones o sistemas. La mayoría de estas herramientas son Sistemas de Gestión de Base de Datos (SGDB) con características “*espaciales*”.

A partir del uso de algunas de las herramientas mostradas se realizó un conjunto de pruebas demostrándose que, con los datos existentes en la actualidad de la red vial de La Habana, los resultados en la resolución del problema para encontrar la ruta más corta, son similares entre todas las herramientas. Se destaca entre estos resultados el muy similar comportamiento de los algoritmos Dijkstra y A\*, tanto con respecto al tiempo de ejecución (A\* siempre menor), como a la distancia de la ruta más corta (siempre igual).

Estos resultados permiten afirmar que la selección de una u otra de estas herramientas dependerá del contexto en el que se deseen usar y no de sus características para realizar análisis de redes viales, pues en sentido general todas tienen un comportamiento similar.

Por último, es importante destacar que en Cuba también se han alcanzado ciertos avances en el análisis de redes viales, algunos de los cuales son mostrados en este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones de Anaisa Hernández González, Alejandro Rosete Suárez y Rolando Acosta Sánchez, en la revisión de este documento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Consejería de Fomento, "Sistemas de localización e información geográfica," 2009.
- [2] J. Bosques, *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Ediciones Rialp S.A., 2000.
- [3] P. A. Burrough, *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Vol. 12. New York: Clarendon Press, 1986.
- [4] K. K. Kemp and M. F. Goodchild, "Introduction to GIS," in *NCGIA core curriculum*, Vol. 1, Santa Barbara, California: NCGIA-Geography Dept., University of California at Santa Barbara, 1990.
- [5] F. S. Moreno Fernández and G. Miranda Valdés, "Base de Datos cartográfica nacional callejera para múltiples usos," presented at the 8th Congreso Internacional de Geomática, La Habana, 2013.
- [6] OpenStreetMap. (2013). *Planet OSM* [online]. Available: <http://planet.openstreetmap.org/>
- [7] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269-271, 12-01 1959.
- [8] R. Rodríguez Puente, "Modelo basado en grafos reducidos para la representación y análisis de redes en Sistemas de Información Geoespacial," Doctor, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, La Habana, 2012.
- [9] D. Delling, "Engineering and Augmenting Route Planning Algorithms," Doctoral, Fridericana zu Karlsruhe, Hamburg, 2009.
- [10] I. Rihawl Aragon (2009, Diciembre 18). *Búsqueda no informada: Algoritmo de Coste Uniforme* [online]. Available: <http://poiritem.wordpress.com/2009/12/06/6-5-1-busquedano-informada-algoritmo-de-coste-uniforme/>
- [11] R. Johnsonbaugh, *Matemáticas discretas*, Vol. 2, La Habana: Felix Varela, 2004.
- [12] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael. (1968, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *Volume: 4(Issue: 2)*.
- [13] A. Rodríguez Villalobos, "Grafos: herramienta informática para el aprendizaje y resolución de problemas reales de teoría de grafos," presented at the tenth Congreso de Ingeniería de Organización, Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Organización - ADINGOR, Valencia, 2006.
- [14] P. L. Ángel Restrepo and L. F. Marín Sepúlveda, "Un método computacional para la obtención de rutas óptimas en sistemas viales," in *Dyna*, pp. 112-121, 2011.
- [15] R. Kothuri, A. Godfrind, and E. Beinat, *Pro Oracle Spatial for Oracle Database 11g*. Apress, 2007.
- [16] E. Pena Alonso, "Sistema de Análisis de Redes Viales en la Provincia de Villa Clara," in *VII Congreso Internacional GEOMATICA 2011*, La Habana, 2011.
- [17] M. A. Barrientos Martínez, "Network Analyst: Análisis de redes desde ArcGIS 9.2," 2007.
- [18] L. Hsu and R. Obe, "Cross Compare of SQL Server, MySQL, and PostgreSQL," *Postgres OnLine Journal*, Mayo, 2008.
- [19] L. Hsu and R. Obe. (2010). *Compare SQL Server 2008 R2, Oracle 11G R2, PostgreSQL/PostGIS 1.5 Spatial Features* [online]. Available: [http://www.bostongis.com/PrinterFriendly.aspx?content\\_name=sqlserver2008r2\\_oracle-11gr2\\_postgis15\\_compare](http://www.bostongis.com/PrinterFriendly.aspx?content_name=sqlserver2008r2_oracle-11gr2_postgis15_compare)
- [20] Indian Institute of Technology, N. L. Sarda and R. Subham, "Comparison between Oracle & Postgis in terms of Spatial Queries," 2011.
- [21] PostgreSQL. (2013, Junio). *Guía de inicio rápido para pgRouting* [online]. Available: <http://live.osgeo.org/es/index.html>

- [22] PostgreSQL. (2013). *PostGIS* [online]. Available: <http://www.pgRouting.org/>
- [23] R. Budhrani, "Cálculo web de rutas con pgRouting, OpenStreetMap y OpenLayers," ed. Mallorca, 2010.
- [24] A. Furiari. (2013, Junio). *SpatiaLite Cookbook* [online]. Available: <http://www.gaia-gis.it/gaia-sins/spatialite-cookbook/index.html>
- [25] P. SpatiaLite. (2013). *SpatiaLite* [on line]. Available: <https://www.gaia-gis.it/fossil/libspatialite/index>
- [26] A. Furiari. (2011). *SpatiaLite Cookbook* [online]. Available: <http://www.gaia-gis.it/gaia-sins/spatialite-cookbook/index.html>
- [27] Esri. (2013). *Mapping & Analysis for Understanding Our World* [online]. Available: <http://www.esri.com/software/arcgis>
- [28] (2010). *Productos* [online]. Available: <http://www.esri.es/es/productos/arcgis/>
- [29] Esri. (2012). *ArcGIS Resource Center* [online]. Available: <http://help.arcgis.com/es/arcgis-desktop/10.0/help/index.html>
- [30] R. Valdés Yznaga, "Infraestructura de Datos Espaciales: Análisis de Redes Viales en ArcGIS," Ingeniero, Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniería en Informática, La Habana, Cuba, 2011.
- [31] D. Alfonso del Valle, A. Zulueta Amador, G. Miranda Valdez, and P. E. Limia Téllez, "Servicio web de enrutamiento de vehículos," in *Memorias. XV Convención y Feria Internacional Informática 2013*, ed. La Habana, 2013.
- [32] L. Benavides César, J. E. Diéguez Díaz, R. Queralta Pozo, and M. O. Molina Machado, "Servicio provincial de rutas para la IDERC," in *Memorias. XV Convención y Feria Internacional Informática 2013*, ed. La Habana, 2013.
- [33] M. Neteler and H. Mitasova, *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. 3 ed. New York: Springer, 2008.
- [34] T. Brinkhoff, "A framework for generating network-based moving objects," *Geoinformatica*, vol. 6, pp. 153-180, 2002.
- [35] A. Rosete Soares, D. Paredes Miranda, and E. Sánchez Ansola, "Optimización del calendario de la Serie Nacional de Béisbol para reducir el costo de transportación," in *1er Evento Científico del Béisbol Cubano*, La Habana, 2012.