

## Análisis de la infraestructura de transporte aplicando redes complejas: red de avenidas de la ciudad de Celaya, Guanajuato

✉ JOSÉ EDUARDO HERNÁNDEZ-TORRES<sup>1</sup>  
SALVADOR HERNÁNDEZ-GONZÁLEZ<sup>1</sup>  
JOSÉ ALFREDO JIMÉNEZ-GARCÍA<sup>1</sup>  
VICENTE FIGUEROA-FERNÁNDEZ<sup>1</sup>

### Resumen

La infraestructura de los países y las ciudades la forman sistemas de redes; en el caso del transporte terrestre, la infraestructura está formada por redes de carreteras, avenidas y calles. Las medidas de centralidad de las redes complejas permiten cuantificar el desempeño de cada intersección de avenidas o calles en la red. En este artículo, se analizó la red de avenidas principales de la ciudad de Celaya, Guanajuato empleando el enfoque de redes complejas. De la centralidad de intermediación, centralidad de la cercanía, diámetro y el grado promedio, se identificaron las 5 intersecciones con un papel fundamental en la red de vialidades de la ciudad. Los resultados son de interés para profesionales dedicados al diseño de sistemas logísticos y transporte.

**Palabras Clave:** Red de transporte; redes complejas; intermediación; cercanía.

## Application Of Complex Networks Theory For Transportation Infrastructure Analysis: Celaya's City Avenue Network

### Abstract

The streets and avenues networks of a city form the infrastructure of land transport systems. The measures of centrality of complex networks allow to quantify the performance of each intersection of avenues or streets in the network. In this article, Celaya's city network avenues, was analyzed using the complex networks approach. From betweenness centrality, closeness centrality, diameter and average degree; we identify 5 intersections which play a fundamental role in the city's avenue network as well as its location within the city. The results are of interest for professionals dedicated to the design of logistics systems and transportation.

**Keywords:** Transport network; complex networks; betweenness centrality; Closeness centrality.

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México en Celaya, Guanajuato, México

✉ *Autor de correspondencia: Hernández Torres, J.E. (José Eduardo):* Calle Presa Falcon No.154 Col. Alfredo V. Bonfil C.P. 38010, Celaya, Guanajuato. Celular: (01) 2721160977 Correo electrónico: m1803006@itcelaya.edu.mx

*Historia del artículo:*  
Artículo recibido: 22-III-2019/ Aprobado: 15-I-2020  
Disponibile online: 15 de enero de 2020  
Discusión abierta hasta septiembre de 2021

# Análise da infra-estrutura de transporte que aplica redes complexas: rede da avenida da cidade de Celaya, Guanajuato

## Resumo

Infra-estrutura de países e cidades é formada por sistemas de rede; No caso do transporte terrestre, a infra-estrutura é formada por redes de estradas, avenidas e ruas. As medidas de centralidade das redes complexas permitem quantificar o desempenho de cada interseção de avenidas ou ruas na rede. Neste artigo, analisou-se a rede de avenidas principais da cidade de Celaya, Guanajuato, utilizando a abordagem de redes complexas. A partir da centralidade da intermediação, a centralidade da proximidade, o diâmetro e a nota média permitiram identificar as 5 interseções com papel fundamental na malha viária da cidade. Os resultados são de interesse de profissionais dedicados ao design de sistemas logísticos e de transporte.

**Palavras chave:** Rede de transporte; redes complexas; intermediação; proximidade.

---

## 1. Introducción

La red de transporte es fundamental para el desarrollo y crecimiento de una comunidad, ya que posibilita el transporte de personas y mercancías desde un lugar a otro, permitiendo satisfacer necesidades básicas como la educación, el trabajo, la alimentación y la salud; para ello es necesario contar con una infraestructura que asegure la eficiencia y la seguridad del libre tránsito (Rui, Ban, Wang, & Haas, 2013).

La infraestructura de los países y las ciudades la forman sistemas de redes: acueductos, alcantarillado, riego, telecomunicaciones, energía y transporte. En el caso del transporte terrestre, la infraestructura está formada por el conjunto de carreteras, avenidas y calles de una ciudad, región o país. El análisis de estas estructuras proporciona información a los responsables de planificar y diseñar sistemas de transporte sobre puntos de transferencia, longitud de un viaje, y en general, del papel de una calle o avenida dentro de la red (Huang, Zhu, Ye, Guo, & Wang, 2015). Por ejemplo, se ha observado que dentro de la red existe un conjunto de calles y avenidas que predominan sobre el resto debido a factores como el volumen de tránsito, demanda de transporte o puntos de origen y destino (Saberí, Mahmassani, Brockmann, & Hosseini, 2016). Preguntas como ¿Cuáles son las intersecciones que aparecen con mayor frecuencia en un viaje cuando se circula por la red de avenidas?, ¿Cuáles son las intersecciones más cercanas a cualquier punto de la

ciudad?, ¿Cuántas intersecciones se cruzan en promedio en un viaje promedio? tienen respuesta analizando la estructura de la red y permiten por ejemplo a un usuario tomar decisiones sobre sus viajes.

Por otra parte, esta infraestructura está sujeta a fallas, interrupciones, y errores aleatorios, debido a fenómenos como desastres naturales o bien ataques dirigidos, sus efectos generan un reacomodo del flujo y pueden provocar la congestión e incluso el colapsamiento de las vías o bien de una red (Loteró, 2014).

En este artículo, se analizó la red de avenidas principales de la ciudad de Celaya, Guanajuato (Gto.) empleando el enfoque de redes complejas; utilizando los índices de intermediación, cercanía, grado de un nodo, diámetro y ruta más corta promedio, se cuantificó el desempeño de las intersecciones que forman la red de vialidades principales de la ciudad, con el objetivo de entender el estado actual de la red.

## 2. Estado del Arte

Loteró – Vélez y Hurtado – Heredia (2014) en su artículo sobre la vulnerabilidad de redes complejas y las aplicaciones al transporte urbano, presentan una revisión de la literatura acerca de ello, dando a conocer nuevos enfoques para analizar sistemas de movilidad. Una propiedad de mayor importancia en redes complejas es la capacidad que tienen para mantener sus funciones cuando

ocurren fallas, errores o ataques en sus nodos o vínculos, a lo cual se le llama robustez, resiliencia o vulnerabilidad.

En el artículo “Sistemas de transporte en México: un análisis de centralidad en teoría de redes” se realizó un análisis de centralidad en las medidas de centralidad por cercanía y la espectral, esta información es estratégica para la solución de problemas en muchos casos y se aplicó el concepto de coherencia de una red, medida que indica qué tanto la estructura de la red de transporte está construida de acuerdo con los requerimientos reales (de-la-Peña, 2012).

El artículo “Centrality and network flow” habla sobre las medidas de centralidad y las interpretaciones de dichas medidas que hacen suposiciones implícitas sobre la manera en que el tráfico fluye a través de una red, realizando una tipología de flujos de red basada en dos dimensiones de variación, siendo los tipos de trayectorias que el tráfico puede seguir y el método de propagación (Borgatti, 2005).

En el artículo “Betweenness centrality in a weighted network” aplicaron el análisis de la centralidad de intermediación en redes ponderadas, menciona que cuando el transporte en redes sigue las rutas más cortas, la unión de cada uno de los caminos puede ser considerada como la red de superposición de transporte, o bien un subgrafo (Wang, Martin-Hernandez, & van Mieghem, 2008).

En el artículo llamado “Vulnerability Analysis of Urban Rail Transit Networks: A Case Study of Shanghai, China”, se realizó un análisis de vulnerabilidad de la red y la estación del sistema de tránsito ferroviario urbano, basándose en redes complejas y la teoría de grafos. Identificaron que dicha red es bastante robusta ante los ataques aleatorios, pero es vulnerable a ataques en nodos de mayor grado y en nodos con mayor interrelación (Jian, Zhao, & Lu, 2015).

En el artículo “Measuring centralities for transportation networks beyond structures”, se realizó una investigación sobre el uso de medidas de centralidad para determinar cuáles son los nodos críticos en una red de transporte, con el objetivo de mejorar el diseño de la red y diseñar planes que hagan frente a los fallos de dicha red, aplicándolo en la red del metro de Singapur (Cheng, Roy, Lim, & Zhu, 2015).

En lo referente al análisis de calles y avenidas empleando medidas de centralidad se pueden mencionar los trabajos de (Crucitti, Latora, & Porta, 2006), (Cardillo, Scellato, Latora, & Porta, 2006), (Strano, y otros, 2013) y (Boeing, 2018). Dos conclusiones de estos trabajos son que las calles forman redes donde el grado promedio es menor o igual a 3 y que las medidas de centralidad permiten diferenciar aquellas ciudades con un crecimiento controlado y planificado. También se ha observado que dentro de una red de avenidas existe una jerarquía en cuanto a la relevancia de las vialidades, debida a factores como el volumen de tránsito (20% de las calles captan el 80% del tránsito en una ciudad (Huang, et al. 2015).

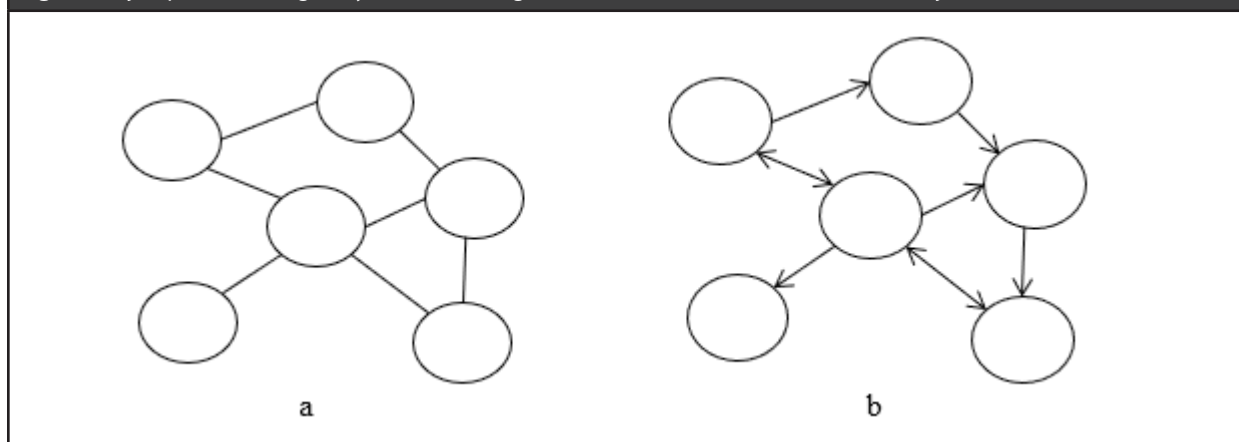
### *Redes complejas*

Existe un consenso en el sentido de que el inicio de la Teoría de Grafos tiene su origen en el trabajo de Euler, cuando propuso el problema conocido como Problema de los Puentes de Königsberg. Con el paso del tiempo, la Teoría de Grafos, el análisis de redes y las redes complejas han sido aplicados a diversas disciplinas, el problema original de la Teoría de Grafos surgió de un problema de transporte urbano (Derrible & Kennedy, 2011).

El auge del estudio de las redes complejas dio inicio a finales de los años 90 dando lugar a un amplio soporte conceptual y metodológico en el análisis de redes sociales y gracias a aportes empíricos y teóricos de la física estadística (Newman M. , 2010).

En el desarrollo del formalismo de las redes complejas, los biólogos, sociólogos, economistas e ingenieros de diversas áreas se han concentrado en la recolección de información empírica y en la fenomenología de diversos sistemas sociales, naturales y artificiales, los matemáticos han hecho aportes en la Teoría de Grafos y los físicos han dado las bases teóricas para la definición de una concepción que integra trabajo empírico, análisis y modelación (Barabási, 2016).

Una red es una representación de los componentes de un sistema, los cuales son llamados nodos o vértices, las interacciones directas que hay entre ellos se representan mediante arcos, llamados también enlaces o bordes (**Figura 1**). Con esta representación mediante una red, es posible estudiar sistemas que pueden diferir mucho en naturaleza, apariencia o alcance (Barabási, 2016).

**Figura 1.** Ejemplo de a). Un grafo y b) una red dirigida, las flechas indican la dirección del flujo

Una red compleja se refiere a una red o grafo, la cual tiene propiedades estadísticas y topológicas cuantificables. En la actualidad las redes complejas se estudian por su relación con muchos campos de la ciencia. Muchos sistemas en la naturaleza se pueden describir por medio de redes complejas.

En este artículo se emplearon algunas de las propiedades de las redes complejas, las cuales se describen a continuación:

#### *Ruta más corta*

Es la trayectoria con la mínima distancia total o costo, que une un nodo origen con un nodo destino. El camino más corto o ruta más corta se le llama a la distancia que hay entre los nodos  $i$  y  $j$ , el cual se denota por  $d_{ij}$ ; se pueden tener diferentes rutas más cortas con la misma longitud  $d$  entre un par de nodos, la ruta más corta nunca contiene ciclos o bucles (Barabási, 2016).

#### *Longitud promedio del camino y diámetro de la red.*

La longitud promedio del camino es el número promedio de nodos de todas las rutas más cortas de la red; el diámetro se refiere a la ruta más corta de mayor longitud en la red (Rodrigue, Slack, & Comtois, 2017). El diámetro cuantifica la capacidad de comunicación entre dos nodos de la red, entre más pequeño, la red está mejor comunicada.

#### *Centralidad de la cercanía*

Otra de las propiedades que se analizó es la centralidad de la cercanía. Esta se basa en calcular la suma

o bien el promedio de las distancias más cortas desde un nodo hacia todos los demás (Sun & Tang, 2011). En este trabajo la cercanía de un nodo  $x$  se calcula mediante la expresión propuesta por Bavelas, la cual es el recíproco de la lejanía:

$$C(x) = \frac{1}{(\sum_y d(y,x))} \quad (1)$$

donde  $d(y,x)$  es la distancia que existe entre los vértices “ $y$ ” y “ $x$ ”.

En una red, la medida de cercanía se puede interpretar como el tiempo de llegada al destino de una entidad que circula por la red (Borgatti, 2005). Otras interpretaciones son:

- Rapidez que tomará la propagación de la información desde un nodo a todos los demás.
- La capacidad que tiene un nodo para acceder o comunicarse con cualquier otro nodo que forma parte de la red (Newman M., 2005).

#### *Centralidad de la Intermediación*

Es una medida que cuantifica la capacidad de un nodo para funcionar como nodo de paso, puente o intermediario dentro del conjunto de rutas más cortas de una red (Sun & Tang, 2011).

Esta medida fue introducida por Linton Freeman en 1977, como una forma para cuantificar el control de un humano en la comunicación existente con otros humanos a través de una red social. La idea es que, si se eligen dos nodos completamente al azar y luego también

al azar uno de los posibles caminos más cortos entre ellos, entonces los nodos con mayor intermediación serán aquellos que tienen mayor probabilidad de formar parte de este camino (Freeman, 1977). La intermediación se calcula con la siguiente expresión:

$$b_i = \sum_{j \neq k} \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (2)$$

Donde  $n(k)ij$  es el número de rutas más cortas que conectan los nodos  $j$  y  $k$  y que utilizan el nodo  $i$ ;  $n_{jk}$  es el número de rutas más cortas entre las estaciones  $j$  y  $k$ . Mark Newman propuso una versión alterna de la medida de intermediación, que se basa en considerar caminos aleatorios del grafo, y no exclusivamente los caminos más cortos. La idea es tomar en cuenta todos los caminos posibles y calcular la medida de acuerdo con los caminos elegidos aleatoriamente (Newman M., 2005).

### Grado promedio

El grado de un nodo es el número de conexiones o arcos que lo conectan con otros nodos. Un ejemplo es el número de citas que recibe un trabajo de investigación en la red de citas (Barabási, 2016). En una red real existen nodos con un gran número de conexiones. El número total ( $G$ ) de arcos en una red no dirigida es:

$$G = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i \quad (3)$$

Por otra parte, el grado promedio (también conocido como índice  $\beta$ ) en una red se obtiene empleando la siguiente expresión:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \frac{2G}{N} \quad (3)$$

### Método

Para el desarrollo de esta investigación primeramente se realizó una investigación documental sobre redes complejas y las propiedades que se analizaron, a través de diferentes fuentes bibliográficas y revistas especializadas, posteriormente se siguieron las siguientes etapas:

- **Selección de la infraestructura a analizar.** Se seleccionó la red de avenidas principales de la Ciudad de Celaya, Guanajuato. La razón de esta decisión radica en el hecho de que las vialidades seleccionadas favorecen la conectividad en la ciudad porque sus características

permiten un flujo vehicular de mayor volumen, circulan varias rutas de autobuses. Por otra parte, sólo se toman las intersecciones entre vialidades, las cuales funcionan como nodos de transferencia (similares a las estaciones de transbordo en sistemas de transporte masivo como el metro), de esta manera, el análisis se centra en las propiedades de transferencia de la red de avenidas en la ciudad (Derrible, 2012).

- **Construir el modelo de red.** Después seleccionar la red de avenidas principales de Celaya y de haber identificado los nodos, se construyó la red, esto se realizó empleando el paquete Gephi, el cual permite obtener las características de redes complejas (Gephi.org, 2017).

- **Analizar y evaluar la red avenidas.** Una vez construido el modelo de red se cuantificaron los índices de intermediación y cercanía, también se cuantificó el grado promedio de la red, los cálculos se realizaron empleando el paquete Gephi. Se construyó la gráfica de probabilidad acumulada de cada medida de centralidad (Cats, 2017).

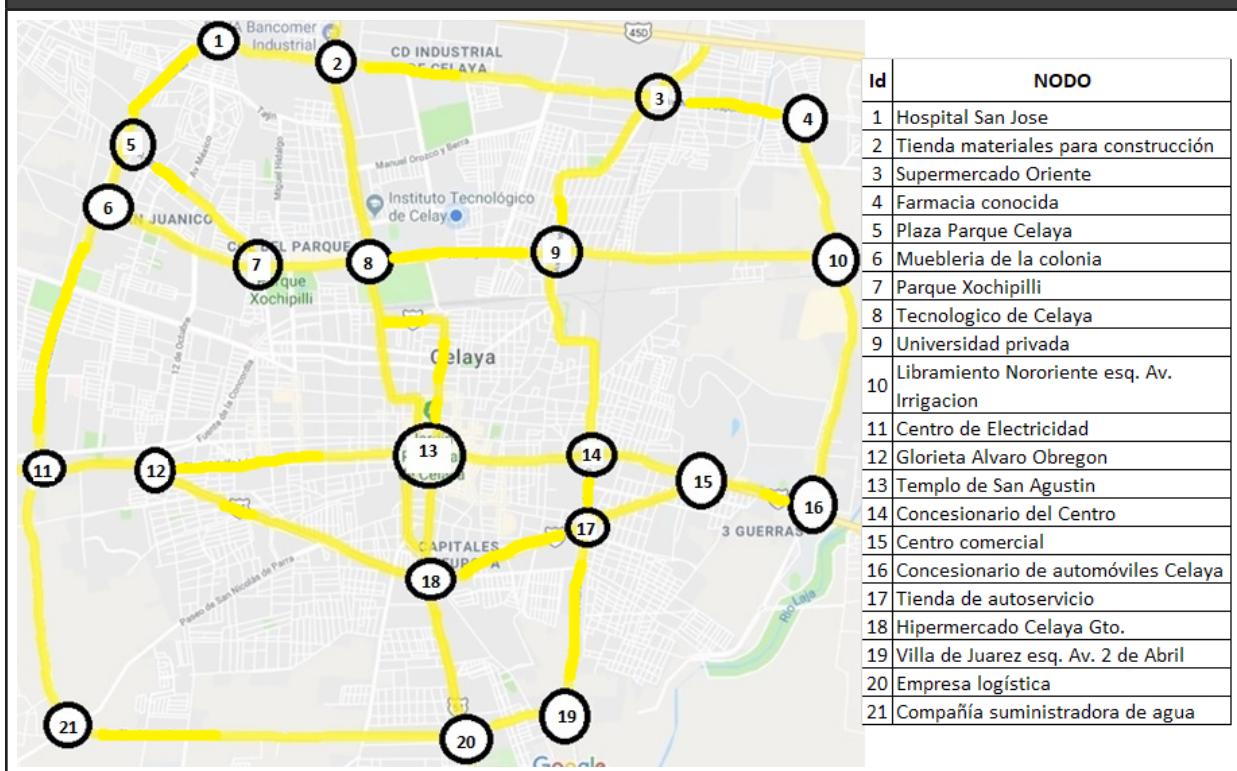
- **Generar conclusiones de acuerdo con lo desarrollado.** En esta última etapa se redactaron conclusiones concretas referente al desarrollo de la investigación.

## 3. Resultados

En la **Figura 2** se muestra el mapa de la ciudad de Celaya, Gto., donde se representan las avenidas principales de la ciudad, los nodos corresponden a las intersecciones que se encuentran en los cruces de dichas avenidas; cabe señalar que los nombres asignados a cada nodo corresponden a una referencia (negocio, edificio, estación de gasolina) conocida y que permite una rápida ubicación de dicho punto en un mapa. Los arcos corresponden a las avenidas que conectan un par nodos, el peso del arco corresponde a la distancia que hay en kilómetros de un nodo a otro.

En la **Figura 2** se aprecia un conjunto de avenidas que forman un circuito que rodea a la ciudad formado por los nodos 19-20-21-11-6-5-1-2-3-4-10-16. Se debe señalar que para la época en la que se realizó esta investigación el arco que une los nodos 16 y 19 correspondía a un camino sin pavimentar, por lo que no se consideró en este trabajo.

**Figura 2.** Representación de nodos en el mapa de la Cd. De Celaya Guanajuato. (Fuente: Elaboración propia)



**TABLA 1.** ORIGEN-DESTINO CON DISTANCIAS (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)

| NODO ORIGEN | NODO DESTINO | DISTANCIA KILÓMETROS | NODO ORIGEN | NODO DESTINO | DISTANCIA KILÓMETROS |
|-------------|--------------|----------------------|-------------|--------------|----------------------|
| 1           | 2            | 1,1                  | 10          | 16           | 2,4                  |
| 1           | 5            | 1,3                  | 11          | 12           | 1                    |
| 2           | 3            | 3,1                  | 11          | 21           | 2,6                  |
| 2           | 8            | 1,9                  | 12          | 13           | 2,6                  |
| 3           | 4            | 1,3                  | 12          | 18           | 2,8                  |
| 3           | 9            | 1,9                  | 13          | 14           | 1,5                  |
| 4           | 10           | 1,4                  | 13          | 18           | 1,2                  |
| 5           | 6            | 0,6                  | 14          | 15           | 1,1                  |
| 5           | 7            | 1,8                  | 14          | 17           | 0,7                  |
| 6           | 7            | 1,6                  | 15          | 16           | 1,1                  |
| 6           | 11           | 2,6                  | 15          | 17           | 1,2                  |
| 7           | 8            | 1,1                  | 17          | 18           | 1,6                  |
| 8           | 9            | 1,7                  | 17          | 19           | 1,8                  |
| 8           | 13           | 2,3                  | 18          | 20           | 1,5                  |
| 9           | 10           | 2,6                  | 19          | 20           | 1                    |
| 9           | 14           | 2,2                  | 20          | 21           | 3,5                  |

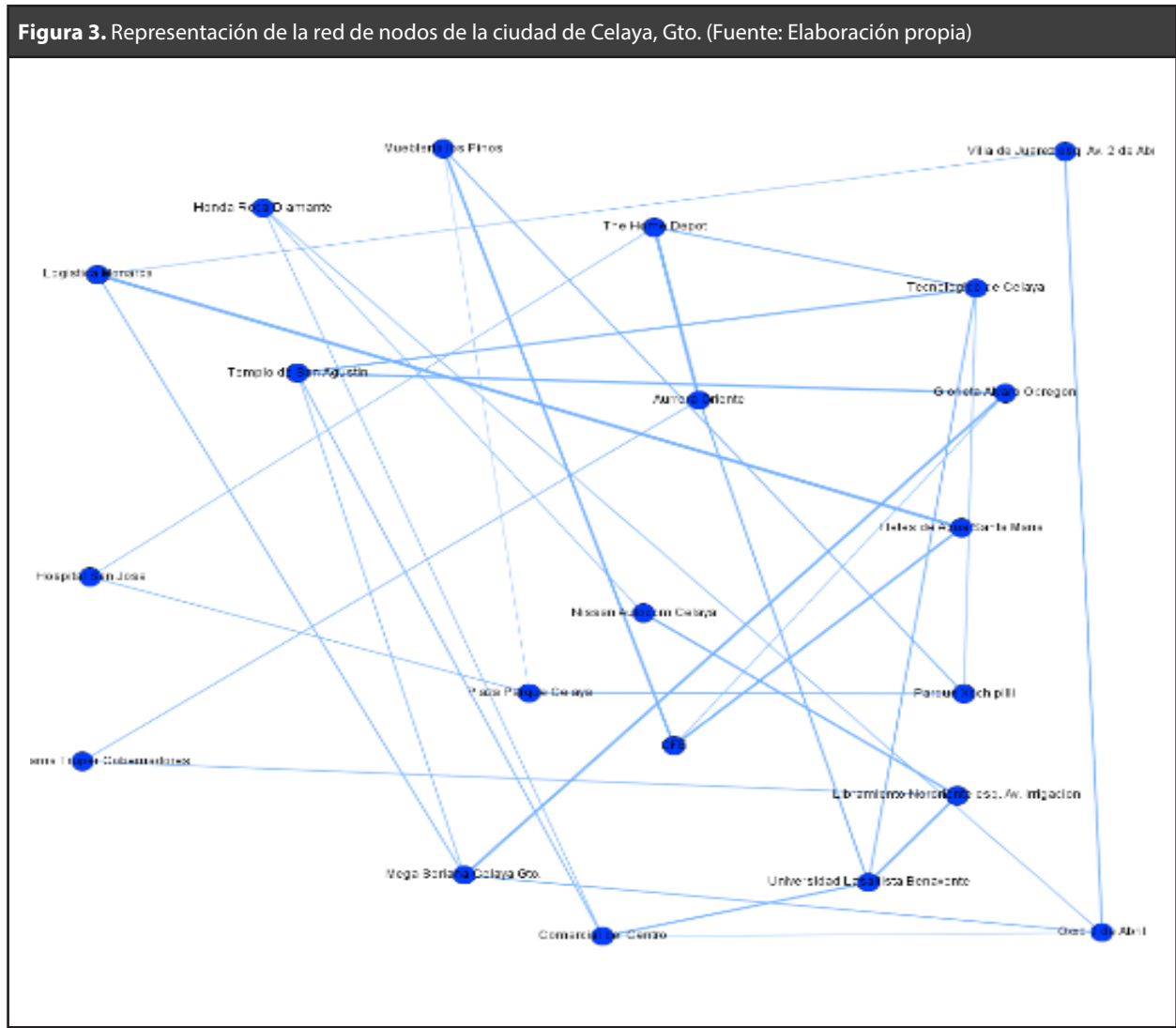
Los nodos 16, 20 y 11 surgen de la intersección que forman una avenida con carreteras que conecta a la ciudad con otras poblaciones: el nodo 16 es la entrada de la carretera Celaya – Querétaro, el nodo 20 corresponde a la carretera Celaya – Salvatierra, el nodo 11 corresponde a la carretera Celaya – Salamanca.

En la misma figura se muestra a la derecha la tabla donde se indica el “Id”, número de nodo y el establecimiento con el que fue identificado cada uno de ellos.

En la **Tabla 1** se puede observar el nodo de origen y el nodo de destino con sus respectivos pesos, que son las distancias en kilómetros que hay entre cada uno de

ellos, de acuerdo con lo especificado en el mapa de la ciudad de Celaya, Gto.

A continuación, se construyó la red empleando el paquete Gephi. En la **Figura 3** se muestra el modelo de red de las avenidas principales de la ciudad de Celaya, Gto; el resultado es una red no dirigida de las avenidas principales de la ciudad de Celaya, ésta muestra cada uno de los nodos con sus conexiones, donde los enlaces o aristas con mayor grosor indican el peso o distancia entre pares de nodos. Un vehículo que circula por una avenida debe recorrer una distancia promedio de 1,75 km  $\pm$  0,72 para conectarse con otra avenida; cabe señalar que el coeficiente de variación es 0,414 lo que indica que la distancia promedio presenta una variabilidad baja.



Para poder observar mejor la distribución de la red, a continuación, se construyó un grafo con el algoritmo de Fruchterman-Reingold, donde los nodos y sus enlaces se distribuyen de acuerdo con sus pesos, de esta manera es posible observar detalladamente cada uno de sus nodos con sus respectivas conexiones. Este algoritmo forma parte de las opciones del programa Gephi.

El algoritmo de Fruchterman-Reingold, es un algoritmo de diseño dirigido por la fuerza. La idea de un algoritmo de diseño de fuerza dirigida es considerar una fuerza entre dos nodos cualesquiera. En este algoritmo, los nodos están representados por anillos de acero y los bordes son resortes entre ellos. La fuerza de atracción es análoga a la fuerza de resorte y la fuerza de repulsión es análoga a la fuerza eléctrica. La idea es minimizar la energía del sistema moviendo los nodos y cambiando las fuerzas entre ellos (Fruchterman & Reingold, 1991). Se aprecia en la **Figura 4** que los nodos Tecnológico de Celaya, Templo de San Agustín, Concesionario del Cen-

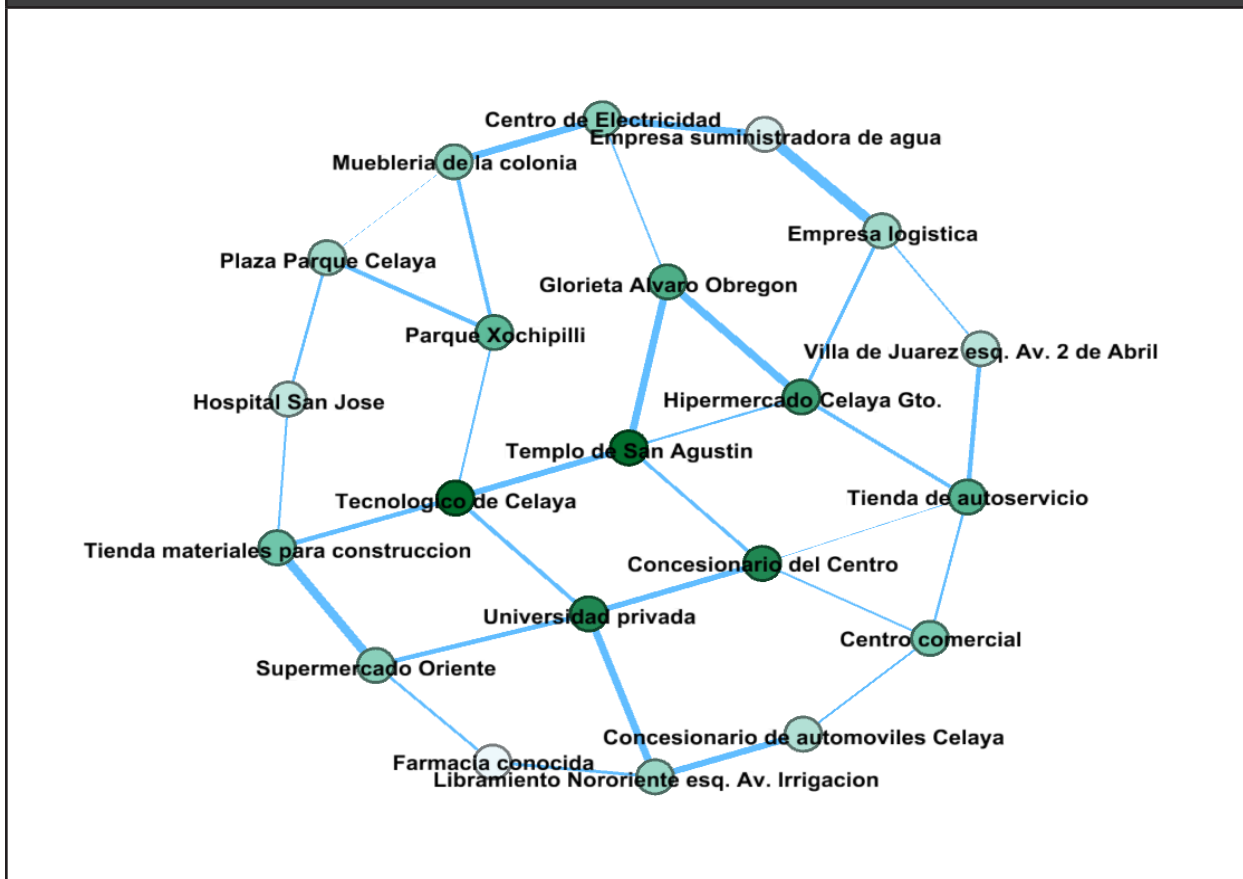
tro, Universidad Privada ocupan la sección central de la red de avenidas, en el contexto de la infraestructura del transporte, estas intersecciones dan cohesión a la red de avenidas, como se verá más adelante, estas intersecciones son ubicaciones que favorecen la comunicación de toda la red.

Lo mencionado en el párrafo anterior no implica que el resto de las intersecciones no sea vital, por el contrario, se debe recordar que cada nodo tiene una función dentro del sistema.

### *Diámetro de la red y longitud promedio del viaje*

La red de vialidades tiene un diámetro de 7 unidades, es decir, el mayor número de intersecciones que deben recorrerse en la ruta más corta de mayor distancia es 7 nodos, por otra parte, la ruta más corta promedio cruza por  $2,96 \approx 3$  nodos o intersecciones.

**Figura 4.** Red de nodos “cercanía” representada con el algoritmo de Fruchterman-Reingold (Fuente: Elaboración propia)





**TABLA 2. GRADO DEL NODO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)**

| Nodo                                   | Grado | Nodo                                       | Grado |
|--|-------|--|-------|
| Tecnológico de Celaya                  | 4     | Libramiento Nororiente esq. Av. Irrigación | 3     |
| Universidad Privada                    | 4     | Centro de Electricidad                     | 3     |
| Templo de San Agustín                  | 4     | Glorieta Álvaro Obregón                    | 3     |
| Concesionario del Centro               | 4     | Centro Comercial                           | 3     |
| Tienda de Autoservicio                 | 4     | Empresa Logística                          | 3     |
| Hipermercado Celaya Gto.               | 4     | Hospital San José                          | 2     |
| Tienda de materiales para construcción | 3     | Farmacia conocida                          | 2     |
| Supermercado Oriente                   | 3     | Concesionario de automóviles Celaya        | 2     |
| Plaza Parque Celaya                    | 3     | Villa de Juárez esq. Av. 2 de Abril        | 2     |
| Mueblería de la colonia                | 3     | Empresa suministradora de agua             | 2     |
| Parque Xochipilli                      | 3     |  |       |

### *Grado de un nodo*

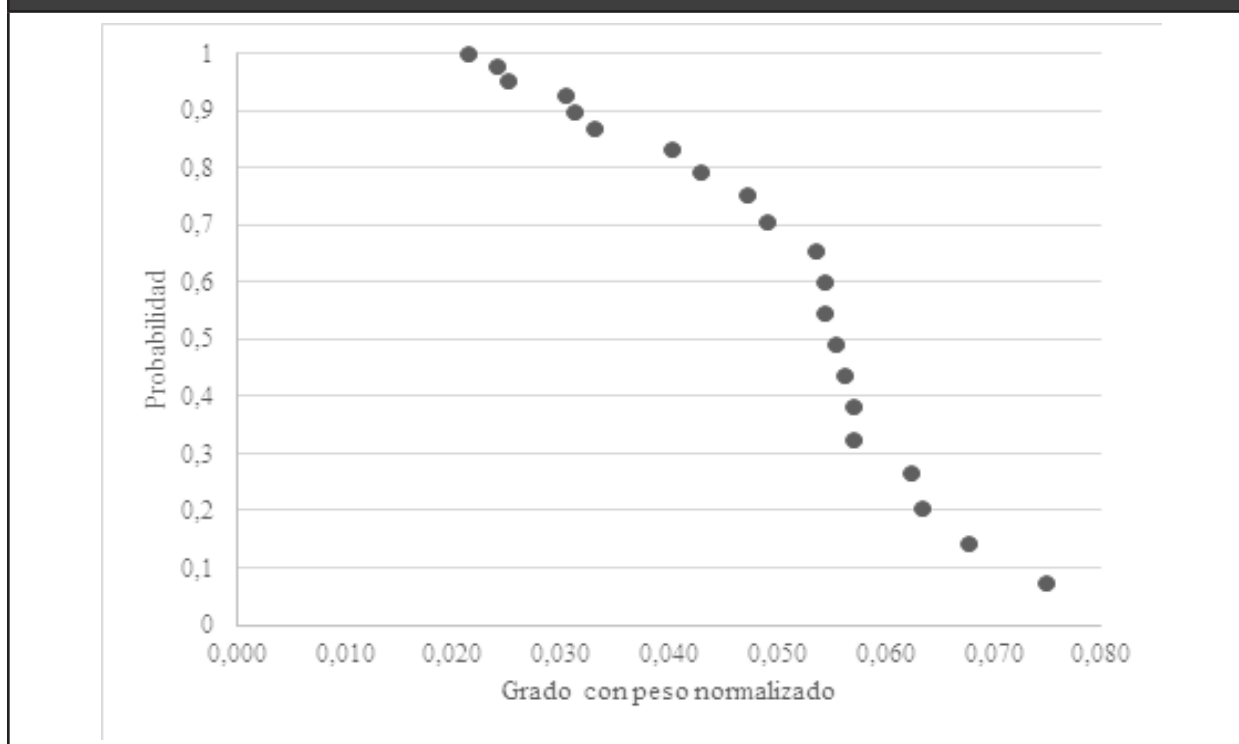
En la tabla se muestra el número de conexiones de cada avenida, se observa que El Tecnológico de Celaya, La Universidad privada, el Templo de San Agustín, el Concesionario del Centro, la tienda de autoservicio y el Hipermercado Celaya, Gto son las avenidas que cuentan con el mayor número de intersecciones con otras avenidas. El grado promedio

es 3,047, es decir, una intersección es un punto de transferencia de tres avenidas.

Por otra parte, en la **Tabla 3** se presenta la clasificación con base al grado con peso, en este caso la suma más grande corresponde a la Universidad Privada, es decir, la distancia acumulada que cubre este nodo es de 8,4 km; le siguen el templo de San Agustín, el Hipermercado Celaya y el Tecnológico de Celaya.

**TABLA 3. GRADO DEL NODO CON PESOS (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA)**

| Nodo                                       | Grado con pesos | Nodo                                | Grado con pesos |
|--|-----------------|-------------------------------------|-----------------|
| Universidad Privada                        | 8,4             | Concesionario del Centro            | 5,5             |
| Templo de San Agustín                      | 7,6             | Tienda de Autoservicio              | 5,3             |
| Hipermercado Celaya Gto.                   | 7,1             | Mueblería de la colonia             | 4,8             |
| Tecnológico de Celaya                      | 7               | Parque Xochipilli                   | 4,5             |
| Libramiento Nororiente esq. Av. Irrigación | 6,4             | Plaza Parque Celaya                 | 3,7             |
| Glorieta Álvaro Obregón                    | 6,4             | Concesionario de automóviles Celaya | 3,5             |
| Supermercado Oriente                       | 6,3             | Centro comercial                    | 3,4             |
| Centro de Electricidad                     | 6,2             | Villa de Juárez esq. Av. 2 de Abril | 2,8             |
| Tienda de materiales para construcción     | 6,1             | Farmacia conocida                   | 2,7             |
| Empresa suministradora de agua             | 6,1             | Hospital San José                   | 2,4             |
| Empresa Logística                          | 6               |                                     |                 |

**Figura 5.** Gráfica de dispersión del grado con pesos (Fuente: Elaboración propia)

La **Figura 5** muestra la distribución de probabilidad normalizada del grado del nodo con pesos (Cats, 2017).

De esta figura se observa que 4 nodos concentran alrededor del 30% de la distancia cubierta por las vialidades de la ciudad.

### *Centralidad de la cercanía*

En la figura 4 se presentó la red resultante con sus pesos y sus conexiones, la intensidad del color de los nodos indica la centralidad de la cercanía; se aprecia que los cinco nodos con índice de cercanía más grande son el Tecnológico de Celaya, el templo de San Agustín, la Universidad Privada, el Concesionario del centro y el Hipermercado Celaya; en términos de distancia, estos puntos son en promedio los más cercanos a cualquier otro nodo dentro de la red.

En el mapa de la ciudad, estos nodos forman un cuadro dentro del cual se ubican una gran cantidad de comercios, la terminal de autobuses y la Central de Abasto de la ciudad, por lo que se presenta un con-

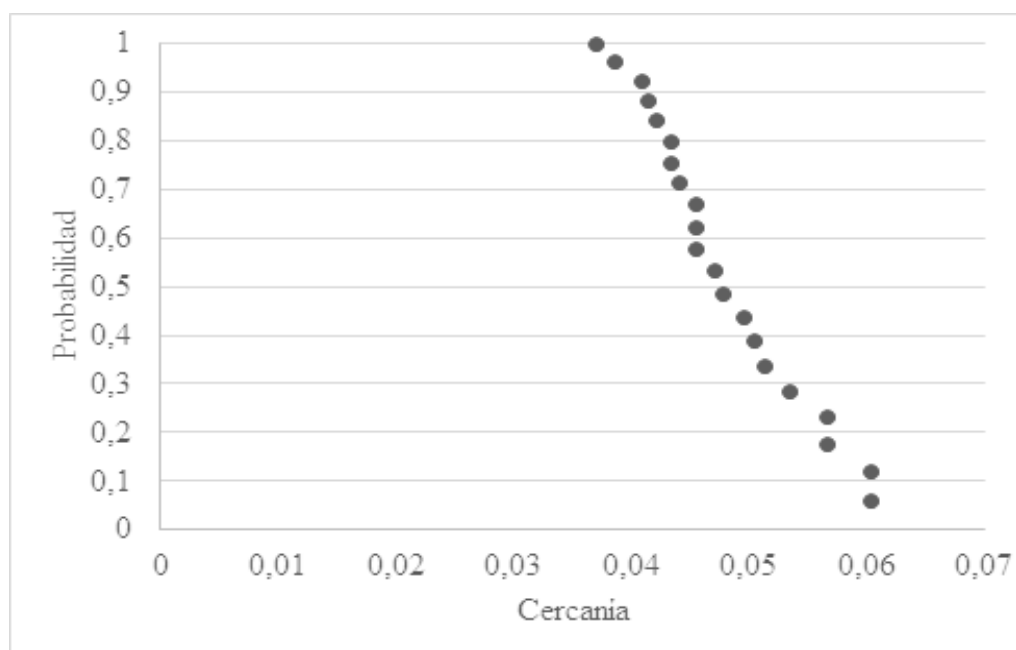
siderable flujo de vehículos. En el caso particular del Hipermercado Celaya, se trata de la conexión con la carretera Celaya – Salvatierra.

El resultado de la centralidad de la cercanía indica que aproximadamente el 20% de los nodos (4 nodos) son los que se encuentran más cerca de cualquier otro punto dentro de la red, en otras palabras, el 80% de las intersecciones entre las avenidas se encuentran muy alejadas entre sí (Figura 6); además estos 4 nodos se encuentran al sur de lo que se conoce como Centro de la ciudad. Este resultado confirma la distribución de los nodos dentro de la red y que se observó en la figura 3 mostrada anteriormente.

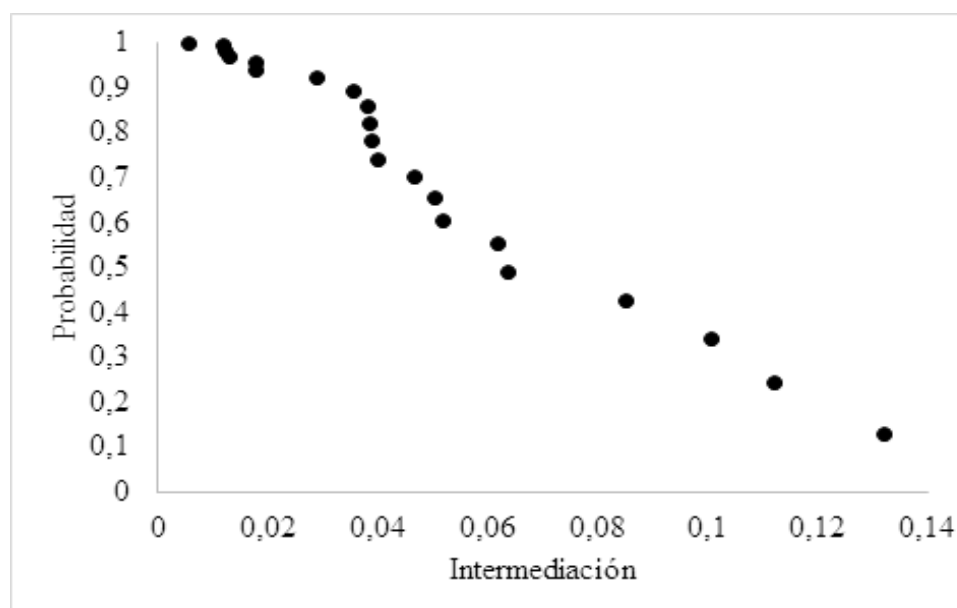
### *Centralidad de la intermediación*

Los nodos con mayor grado de intermediación son el Tecnológico de Celaya, la Universidad Privada, el templo de San Agustín y el Concesionario del centro, estos nodos funcionan como puentes ya que por estos pasan la mayor parte de las rutas más cortas de la red.

**Figura 6.** Gráfica de dispersión de la centralidad de la cercanía



**Figura 7.** Gráfica de dispersión de la centralidad de la intermediación (Fuente: Elaboración propia)



La **Figura 7** muestra la probabilidad acumulada de la intermediación; se aprecia que Tecnológico de Celaya, la Universidad Privada, el templo de San Agustín y el Concesionario del centro controlan el 42% de las rutas más cortas que conforman la red de avenidas seleccionadas, estos nodos forman la cola de la distribución de probabilidad.

#### 4. Conclusiones

Este artículo presenta un análisis de redes complejas para describir y analizar cómo se encuentra distribuida la red de avenidas principales de la ciudad de Celaya, Guanajuato. A partir de los índices de intermediación, cercanía, diámetro y grado, se identificaron los nodos de mayor centralidad dentro de la estructura.

En el caso de la cercanía, el Tecnológico de Celaya, el templo de San Agustín, la Universidad Privada, el Concesionario del centro y el Hipermercado Celaya, son las intersecciones que en promedio se encuentran más cerca de cualquier otra intersección en la red.

En el caso de la intermediación, el resultado muestra que las intersecciones mencionadas anteriormente son los puntos que fungen como puentes y dentro del conjunto de rutas más cortas que conectan los nodos que forman la red de avenidas.

A partir de lo mencionado en los dos párrafos anteriores se puede afirmar que estos cinco nodos son las intersecciones que tienen un papel fundamental en la comunicación de la ciudad, por lo que estas deberían tener prioridad para el desarrollo de planes logísticos de transporte. Cabe señalar que estas se encuentran dentro de la zona comercial de la ciudad.

También se puede concluir que si bien se consideraron 21 intersecciones (nodos), un viaje cruza en promedio  $2.96 \approx 3$  nodos o intersecciones, es decir, en una ruta promedio se utilizan 3 puntos de transferencia. De igual forma, la ruta más corta de mayor distancia cruza 7 nodos.

#### Referencias

- Barabási, A. L. (2016). *Network Science by Albert-László Barabási*. Retrieved 2018, from Network Science by Albert-László Barabási: <http://networksciencebook.com/>
- Boeing, G. (2018). A Multi-Scale Analysis of 27,000 Urban Street Networks: Every US City, Town, Urbanized Area, and Zillow Neighborhood. *Environmental and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 1-18. doi:10.1177/2399808318784595
- Borgatti, S. P. (2005). Centrality and network flow. *Social Networks*, 27(1), 55-71. doi:10.1016/j.socnet.2004.11.008
- Cardillo, A., Scellato, S., Latora, V., & Porta, S. (2006). Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns. *Physical Review E*, 73(6), 1-7. doi:10.1103/PhysRevE.73.066107
- Cats, O. (2017). Topological evolution of a metropolitan rail transport network: The case of Stockholm. *Journal of Transport Geography*, 62(June), 172-183. doi:10.1016/j.jtrangeo.2017.06.002
- Cheng, Y.-Y., Roy, L., Lim, E.-p., & Zhu, F. (2015). Measuring centralities for transportation networks beyond structures. In P. Kazienko, & N. Chawla, *Applications of Social Media and Social Network Analysis* (pp. 23-39). New York: Springer. doi:DOI 10.1007/978-3-319-19003-7\_2
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E*, 73(3), 1-4. doi:10.1103/PhysRevE.73.036125
- de-la-Peña, J. (2012). Sistemas de Transporte en México: un análisis de centralidad en teoría de redes. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 3(3), 72-91.
- Derrible, S. (2012). Network Centrality of Metro Systems. *PlosOne*, 2012, 1-10. doi:10.1371/journal.pone.0040575
- Derrible, S., & Kennedy, C. (2011). Applications of Graph Theory and Network Science to Transit Network Design. *Transport Reviews*, 31(4), 495-519. doi:10.1080/01441647.2010.543709
- Freeman, L. C. (1977). A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, 40(1), 35-41. doi:DOI: 10.2307/3033543
- Fruchterman, T., & Reingold, E. (1991). Graph drawing by Force-directed Placement. *Software—Practice and Experience*, 21(11), 1129-1164.
- Gephi.org. (2017). *Gephi: The Open Graph Viz Platform*. Retrieved from <https://gephi.org/>
- Huang, L., Zhu, X., Ye, X., Guo, W., & Wang, J. (2015). Characterizing street hierarchies through network analysis and large-scale taxi traffic flow: a case study of Wuhan, China. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 43(2), 276-296. doi:10.1177/02658135151614456
- Jian, D., Zhao, Y., & Lu, Q.-C. (2015). Vulnerability Analysis of Urban Rail Transit Networks: A Case Study

of Shanghai, China. *Sustainability*, 7(6), 6919-6936.  
doi:doi:10.3390/su7066919

Lotero, R. G. (2014). Vulnerabilidad de redes complejas y aplicaciones al transporte urbano: una revisión a la literatura. *Revista EIA*, 11(21), 67-78. doi:10.14508/reia.2014.11.21.67-78

Newman, M. (2005). A measure of betweenness centrality based on random walks. *Social Networks*, 27(1), 39-54. doi:10.1016/j.socnet.2004.11.009

Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction*. New York, USA: Oxford University Press.

Rodrigue, J.-P., Slack, B., & Comtois, C. (2017). Green Logistics, in Ann M. Brewer, Kenneth J. Button, David A. Hensher. In *Handbook of Logistics and Supply-Chain Management* (Vol. 2, pp. 339-350). Handbooks in Transport.

Rui, J., Ban, Y., Wang, J., & Haas, J. (2013). Exploring the patterns and evolution of self-organized urban street networks through modeling. *The European Physical Journal E*, 86(3), 86-74. doi:10.1140/epjb/e2012-30235-7

Saberi, M., Mahmassani, H., Brockmann, D., & Hosseini, A. (2016). A complex network perspective for characterizing urban travel demand patterns: graph theoretical analysis of large-scale origin-destination demand networks. *Transportation*, 44(6), 1383-1402. doi:10.1007/s11116-016-9706-6

Strano, E., Viana, M., da-Fontoura-Costa, L., Cardillo, A., Porta, S., & Latora, V. (2013). Urban street networks, a comparative analysis of ten European cities. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 40, 1071-1086. doi:10.1068/b38216

Sun, J., & Tang, J. (2011). A Survey of Models and Algorithms for Social Influence Analysis. In C. Agarwal, *Social Network Data Analytics* (pp. 177-214). Nueva York: Springer Science. doi:10.1007/978-1-4419-8462-3\_7

Wang, H., Martin-Hernandez, J., & van Mieghem, P. (2008). Betweenness centrality in a weighted network. *Physical Review E*, 77, 1-10. doi:10.1103/PhysRevE.77.046105

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /  
TO REFERENCE THIS ARTICLE /  
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Hernández-Torres, J.E.; Hernández-González, S.; Jiménez-García, J.A.; Figueroa-Fernández, V. (2020). Análisis de la infraestructura de transporte aplicando redes complejas: red de avenidas de la ciudad de Celaya, Guanajuato. *Revista EIA*, 17(33) enero-junio, Reia33004 pág. 1-13. Disponible en: <https://doi.org/10.24050/reia.v17i33.1305>