

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Unidad Mérida

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA**

**“Estudio del Impacto de la Red Vial Sobre los Índices de Ira al  
Volante en la Ciudad de México”**

TESIS

Que presenta

**Carlos Alberto López Castro**

Para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias**

en

**Fisicoquímica**

Director de Tesis:

**Dr. Rodrigo Huerta Quintanilla**

Mérida, Yucatán, México

agosto de 2020

## **Agradecimientos**

A mi familia por el apoyo incondicional, las enseñanzas brindadas y la fe depositada en mí a lo largo de los años; son y serán mi inspiración en cualquier proyecto. A mis amigos por las noches de desvelo, las risas y buenas memorias. A Silvana, por ser parte de ambos grupos.

Al Dr. Rodrigo Huerta Quintanilla por permitirme unirme a su grupo de trabajo y por las observaciones que sirvieron de guía a lo largo de este trabajo.

A la Dra. Ana María Hernández Hernández cuyo conocimiento, apoyo, entusiasmo y constancia no sólo fueron clave para el desarrollo de esta tesis, sino que son un ejemplo de lo que un profesional de la ciencia debe ser y hacer.

A mis sinodales el Dr. Rodrigo Patiño Díaz y el Dr. Juan José Alvarado Gil por los comentarios para mejorar la estructura y contenido de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría.

## Índice General

Lista de Abreviaturas.....	III
Resumen.....	IV
Abstract .....	V
1. Introducción .....	1
1.1. Organización del Trabajo.....	1
1.2. Objetivos .....	2
2. Marco Teórico .....	6
2.1. Redes Primarias.....	6
2.1.1. Grafos, Nodos y enlaces .....	6
2.1.2. Grados y Grados Promedios.....	7
2.1.3. Caminos y Distancias .....	8
2.1.4. Conectividad.....	9
2.2. Redes Duales .....	10
2.3. Modelos de Redes.....	11
2.3.1. Redes Aleatorias.....	12
2.3.2. Redes Libres de Escala.....	15
3. Metodología para la Obtención y Caracterización de Redes .....	18
4. Resultados y Discusiones.....	22
4.1. Relación Entre Datos Topológicos y DAS (Driving Anger Scale) de las Colonias .....	22
4.2. Alcaldías.....	28
5. Conclusiones.....	30
6. Perspectivas .....	32
Referencias Bibliográficas .....	33
Apéndices .....	38
Apéndice A. Lista y Abreviaciones de Colonias .....	38
Apéndice B: Datos de Colonias Red Primaria .....	39
Apéndice C. Datos de Colonias Red Dual .....	40
Apéndice D. Datos Alcaldías .....	41

## Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Significado
$\langle B \rangle / \langle B_d \rangle$	Promedio de Intermediación de los nodos en la red primaria /red dual
$\langle C \rangle / \langle C_d \rangle$	Grado de agrupamiento de los nodos en la red primaria/red dual
$\langle C_{cen} \rangle / \langle C_{cen}^d \rangle$	Promedio de la cercanía en la red primaria/dual
DAS	Escala de Ira al Volante (Driving Anger Scale)
$d_{max}$	Diámetro de la red
$k/k_d$	Grado de los nodos en red primaria/red dual
$k_{in} / k_{out}$	Grado de entrada/salida de los nodos
$\langle k \rangle / \langle k_d \rangle$	Grado promedio de la red primaria/red dual
$\langle k_{in} \rangle / \langle k_{out} \rangle$	Gado promedio entrada/salida de la red
$\langle k_{neig} \rangle / \langle k_{neig}^d \rangle$	Promedio del grado promedio de los vecinos red primaria/red dual
$N / N_d$	Número de nodos totales en la red primaria/red dual
$N_{den}$	Densidad de nodos en la red
$L / L_d$	Número de enlaces totales en la red primaria/red dual

## Resumen

Desde la logística detrás del transporte público hasta la construcción de diversos tipos de vialidades como ciclovías, avenidas y pasos peatonales, las ciudades modernas se enfrentan a un sinnúmero de problemas relacionados con la movilidad de sus habitantes. Uno de estos múltiples problemas es el padecimiento de la ira al volante cuyos pacientes son propensos a infringir las leyes viales, a sufrir más estrés al manejar y a tener más accidentes en el camino. Se ha encontrado que los niveles de ira están correlacionados con toda clase de aspectos de la personalidad de los conductores. No obstante, el estudio de la red vial que es donde ocurren la mayoría de interacciones entre los conductores, se deja de lado cuando se estudia el problema de la ira.

En este trabajo se correlacionaron las características de las redes viales de la Ciudad de México con los niveles de ira disponibles, expresados en la *Escala de Ira al Volante (Driving Anger Scale o DAS)*. Para lograrlo, se tomaron y analizaron las redes viales de 16 alcaldías de la ciudad y 42 colonias mediante la librería OSMnx de Python, que utiliza un enfoque primario en la obtención de las redes (Intersecciones como nodos, calles como enlaces). Después, se utilizó un enfoque dual (calles con un mismo nombre como nodos, intersecciones como enlaces) para el análisis exclusivo de las redes de las colonias. Una vez obtenidos los datos de las colonias y alcaldías, se observaron ciertas similitudes entre las distribuciones de grado de las redes estudiadas y los modelos de redes aleatorias y libres de escala de la teoría de redes. Finalmente, se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre los índices de ira de las colonias y todos los datos topológicos de sus redes viales; tanto para el enfoque primario como el dual. Los resultados muestran que, aún con los valores más altos de los coeficientes obtenidos, no es posible considerar la existencia de alguna correlación entre los valores topológicos de las redes y los índices de ira.

**Palabras Clave:** red vial, ira al volante

## **Abstract**

From the logistics behind public transportation to the construction of all kind of roads such as bike lanes, avenues and pedestrian crossings, modern cities face a host of problems related to the mobility of their inhabitants. One of these problems is road rage whose patients are prone to breaking the road law, suffering more stress while driving and having more road accidents. It has been found that road rage is related to all kind of driver's personality traits. However, the urban street network in which most interactions between drivers occurs, is neglected when studying road rage.

In this work the road rage levels measured via the Driving Anger Scale (DAS) are correlated with the characteristics of the street network in Mexico City. To achieve this, street networks of 16 mayoralities and 42 neighborhoods in the city were extracted and analyzed using OSMnx a Python's library, which uses the primal approach to obtain the street network (intersections as nodes, streets as links or edges). Afterwards, a dual approach was used (same-named streets as nodes, intersections as edges) to the exclusive analysis of the neighborhoods. Once the neighborhoods and mayoralities' data was obtained, certain similarities between the degree distribution of the studied networks and the models of random networks and scale-free networks from network theory were observed. Finally, the Pearson's correlation coefficients were calculated for all involved variables and available road rage data both in the primal and dual approach finding that, even the greatest value among these coefficients is not large enough to signify a meaningful correlation between the topological values and the neighborhood's DAS indexes.

**Keywords:** road rage, urban street networks

# 1. Generalidades

## 1.1. Organización del trabajo

La tesis está organizada de la siguiente manera:

- **Generalidades:** Se ofrece una primera aproximación al trabajo realizado y a las metodologías utilizadas. Además, se establecen los objetivos a cumplir en esta tesis.
- **Marco teórico:** Se establecen y definen los conceptos base sobre los cuales se fundamenta el trabajo, explicando las ecuaciones y enfoques utilizados, así como las diferencias entre ellos.
- **Metodología para la obtención y caracterización de redes:** Se detallan los procesos, los programas utilizados y las caracterizaciones realizadas sobre las redes viales estudiadas. Mostrando *grosso modo* los resultados.
- **Resultados y discusiones:** Se detallan los resultados obtenidos y se discuten sus respectivas implicaciones. También se muestran las diferencias entre los enfoques utilizados.
- **Conclusiones:** Se presentan las aportaciones y perspectivas más relevantes de este trabajo.
- **Apéndices:** Se muestran las tablas con todos los datos obtenidos en este trabajo, así como la lista de las alcaldías y colonias estudiadas.

## 1.2. Objetivos

**Objetivo general:** Buscar alguna correlación entre los datos topológicos de las redes viales de cuarenta y dos colonias de la Ciudad de México y sus respectivos datos de ira al volante.

### Objetivos Específicos:

1. Obtener las redes viales de todas las alcaldías de la ciudad y de las colonias con las que se cuenta con datos de ira para caracterizarlas mediante dos enfoques: el primario y el dual.
  - I) Obtener las redes primarias por medio del uso de OSMnx.
  - II) Limpiar las redes de los nodos redundantes, como los que se presentan en las rotondas o los nodos intermedios que no indican cruces, pero sí curvaturas en las calles reales.
  - III) Caracterizar las redes limpias y obtener sus datos topológicos.
  - IV) Obtener las redes duales mediante un código de Python desarrollado para este propósito en conjunto con OSMnx.
  - V) Caracterizar las redes duales y obtener sus datos topológicos.
2. Buscar si existe una correlación entre la topología de las redes viales de las colonias y los datos de ira al volante disponibles.

### 1.3. Introducción

La optimización de la movilidad ciudadana es uno de los muchos problemas que enfrenta cualquier ciudad. En México, el reto es considerable debido en gran parte al continuo crecimiento del parque automotor, el cual ha incrementado desde los 5,758,330 vehículos registrados en 1980, hasta los 47,790,950 registrados en el 2018 (<https://www.inegi.org.mx/temas/vehiculos/>). Las consecuencias de este crecimiento se ven reflejadas en la falta de espacios para la movilidad de los peatones, el incremento en los tiempos de desplazamiento, el aumento de accidentes, infracciones de tránsito, mayor estrés al conducir, entre otros (Batty, 2018; Desmond & Matthews, 2009; Ge et al., 2014; Jones, 2014; Yinon & Levian, 1995).

La ira al volante incluye algunos de estos aspectos, siendo un importante reto que enfrentan las grandes ciudades. Varios estudios han abordado el problema desde el punto de vista psicológico, tratando de correlacionar los niveles de ira con aspectos de la personalidad, las horas de manejo, el género, el ambiente circundante y el tipo de automóvil que se conduce (Burt, Chraif, Anit, & Mih, 2016; Bushman, Steffgen, Kerwin, Whitlock, & Weisenberger, 2018; Dorantes Argandar, Cerda Macedo, Tortosa Gil, & Ferrero Berlanga, 2015; Galovski & Blanchard, 2004; Monteiro, Coelho, Hanel, Pimentel, & Gouveia, 2018; Smart et al., 2010). Sin embargo, estos estudios se centran en el aspecto psicológico y rara vez se analiza el entorno inmediato tal como lo es la red vial. De hecho, en muchas ocasiones ésta crece de forma relativamente autoorganizada y sin planeación junto a la mancha urbana. Por lo general, las redes viales se analizan para obtener información relevante que permita el crecimiento urbanístico planeado y/o la planeación de rutas de ingreso y egreso a eventos masivos mediante la teoría de redes, la modelación basada en agentes y otras técnicas que describen su evolución, topología, conectividad y eficiencia (Achibet, Balev, Dutot, & Olivier, 2014; Barredo, Demicheli, Lavalle, Kasanko, & McCormick, 2004; Boeing, 2018; Courtat, Gloaguen, & Douady, 2011; Knight & Marshall, 2015; Porta, Crucitti, & Latora, 2006).

Este trabajo busca estudiar una posible relación entre la ira al volante que sufren los conductores y la red vial en la cual se llevan a cabo las interacciones entre ellos.

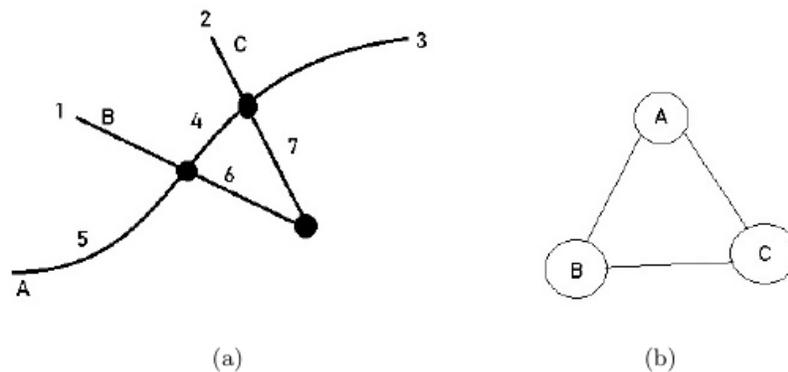
Con esta finalidad, se buscaron correlaciones entre los datos topológicos de las redes viales correspondientes a 42 colonias de la Ciudad de México, en las cuales Hernández-Hernández *et al.* obtuvieron datos de ira al volante mediante la aplicación de una versión modificada de la encuesta *Escala de Ira al Volante* (DAS por sus siglas en inglés) desarrollada por Deffenbacher *et al.* (J. L. Deffenbacher, Oetting, & Lynch, 1994; Feng et al., 2017; Hernández-Hernández, Robles-Belmont, & Gershenson, 2019).

Por otro lado, las redes viales constan de un conjunto de nodos y enlaces que representan a las calles de una ciudad. Existen dos enfoques que permiten el análisis de dichas redes denominados como primario y dual. En el enfoque primario los nodos representan las intersecciones entre las calles y los enlaces representan los segmentos de calles entre las intersecciones, mientras que en el enfoque dual las calles se representan mediante nodos y las intersecciones entre ellas se representan mediante enlaces.

Para obtener información acerca de las redes viales y correlacionarla con los datos de ira al volante disponibles, se usaron los archivos *shape* o archivos *.shp* (polígonos con datos geo-referenciados de las áreas de interés) de todas las alcaldías y de 42 colonias de la Ciudad de México, los cuales fueron obtenidos a través del portal de datos abiertos de la Ciudad de México (<https://datos.cdmx.gob.mx/pages/home/>). Se realizaron pequeñas modificaciones sobre los contenidos de los archivos *.shp* utilizando el programa de licencia abierta QGIS con el propósito de abarcar la red vial contenida en la superficie registrada por las instituciones gubernamentales. Al hacer esto, se busca tener la menor pérdida de enlaces posible debido a los límites de las áreas a estudiar. Una vez definidos los límites de las colonias y alcaldías, se utilizó la librería OSMnx de Python, desarrollada por Geoff Boeing del Departamento de Planeación Urbana y Regional de la Universidad de California (Boeing, 2017), con el fin de obtener y caracterizar las redes viales utilizando aplicaciones como OpenStreetMaps. OSMnx utiliza el enfoque primario en la construcción de las redes viales es decir que, los segmentos de calles que preceden a una intersección, son representados como enlaces y las intersecciones entre estos segmentos son representadas como nodos dando como resultado un multidigrafo que es un grafo en el cual los nodos pueden

contener múltiples enlaces dirigidos y bucles entre ellos (estos últimos ocurren cuando un segmento de la ciudad tiene sólo un punto de acceso, como es el caso de las *privadas* o los *cotos*) y que contiene toda la información acerca de la topología de la red. Bajo este enfoque, una misma calle será representada como un conjunto de nodos y enlaces (*Figura 1(a)*).

Los multidigrafos de las colonias y las alcaldías, se caracterizaron de manera cuantitativa mediante la obtención de datos como el número de nodos totales, densidad y valores relacionados a su conectividad (coeficiente de agrupamiento, cercanía, etc.), entre otros. Una vez obtenidos estos datos, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para buscar alguna correlación entre los datos topológicos de las colonias y sus respectivos datos de ira.



*Figura 1. Ejemplos de Formación de Redes. (a) Formación de red bajo el enfoque primario. Se observa que la calle A está representada por tres enlaces (5,4,3) y dos nodos (puntos oscuros). (b) Enfoque dual, la calle A interseca con la calle B y la calle C, lo que forma un circuito entre los nodos. [Imagen generada por el autor]*

Finalmente, una vez concluido el análisis anterior, se procedió a utilizar el enfoque dual para el análisis de las redes de las colonias. En este enfoque, la red se construye considerando a las calles como nodos y a las intersecciones como enlaces. Se utilizó el nombre de la calle como criterio para etiquetar con el mismo identificador (ID) a una calle y así convertirla en nodo en la red dual (*Figura 1(b)*). Para la construcción de las redes duales, se utilizaron los mismos archivos .shp para las colonias y, dado que el nombre de cada calle y su *importancia* (calle primaria, secundaria, etc.) está contenido en estos archivos, se utilizó esto como criterio de selección de nodos y enlaces. Una vez obtenidas las redes se calcularon

los respectivos valores topológicos y se repitió el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson con los índices de ira de las colonias.

## **2. Marco teórico**

### **2.1. Redes primarias**

#### **2.1.1. Grafos, nodos y enlaces**

Una red es una forma de representar un sistema, donde los componentes del mismo se representan mediante puntos y reciben el nombre de *nodos*. Las interacciones entre los nodos se denominan *enlaces* y se representan mediante líneas, que conectan dos o más nodos, si es que hay alguna interacción entre ellos. Tanto nodos como enlaces pueden representar casi cualquier sistema y sus interacciones. Por ejemplo, si el sistema fuera la red eléctrica, los nodos podrían ser las plantas eléctricas y los enlaces podrían ser los cables de alta tensión entre ellas, o si el sistema fuera una muestra con proteínas, los nodos podrían ser las proteínas mismas y los enlaces sus interacciones intermoleculares. Incluso, si el sistema fuera la red de actores en Hollywood, los nodos serían los actores y los enlaces podrían ser las películas en las que dos o más actores han trabajado juntos. En una red vial, los nodos serán las intersecciones entre las calles y los enlaces serán las calles mismas.

El número de nodos presentes en una red se denomina  $N$  y representa el tamaño de la red. Para distinguir entre los nodos se les etiqueta como  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ . Por otro lado, el número de enlaces se denomina  $L$  y éstos pueden ser dirigidos o no dirigidos, dependiendo del tipo de relación entre los nodos. Por ejemplo, si el estudio fuera acerca de una red de amistad, donde los nodos son personas y los enlaces son la amistad entre ellas, se tendría un enlace no dirigido si la persona *uno* considerara a la persona *dos* como su amigo y la persona *dos* correspondiera al sentimiento. Sin embargo, si alguna de las personas involucradas no correspondiera al sentimiento de amistad, se tendría un enlace dirigido, representado como una flecha apuntando desde un nodo hasta el otro. En una red vial, los enlaces estarán

dirigidos de acuerdo al sentido único o doble de las calles que representan. Una red se llama dirigida o *digrafo* si sus enlaces son dirigidos, mientras que será llamada no dirigida si sus enlaces son no dirigidos. Sin embargo, muchas redes presentan ambos tipos de enlaces y bucles lo que las vuelve un *multidigrafo*. Las redes viales pertenecen a esta última categoría debido a que pueden existir múltiples tipos de enlaces entre los nodos.

### 2.1.2 Grados y grados promedio

Un par de características primordiales de una red son el *grado*  $k$  y el *grado promedio*  $\langle k \rangle$  que se definen, respectivamente, como el número de enlaces que conectan a un nodo  $i$  con sus vecinos y como el promedio de los grados de todos los nodos presentes en la red. Es de esperar que tanto  $k$  como  $\langle k \rangle$  dependan de los enlaces presentes entre los nodos y del hecho de que éstos sean dirigidos o no; La relación entre el grado, el grado de entrada y el grado de salida se expresa en la ecuación (1). Por otra parte, en caso de que la red sea no dirigida, el valor promedio de los nodos se expresa como la ecuación (2). Finalmente, dado que en una red dirigida un nodo puede tener un *grado de entrada*  $k^{in}$  y un *grado de salida*  $k^{out}$ , la definición de sus respectivos promedios  $\langle k^{in} \rangle$  y  $\langle k^{out} \rangle$  se muestra en la ecuación (3).

$$k_i = k_i^{in} + k_i^{out} \quad (1)$$

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i = \frac{2L}{N} \quad (2)$$

$$\langle k^{in} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i^{in} = \langle k^{out} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i^{out} = \frac{L}{N} \quad (3)$$

donde  $k_i$  es el grado del nodo  $i$ . De las ecuaciones (2) y (3) se puede observar que hay una diferencia de un factor de dos. Esto se debe a que en una red dirigida el conteo de enlaces para los de entrada y salida se hace de manera separada, mientras que en una red no dirigida se considera que están presentes ambos enlaces de manera simultánea, es decir, el nodo  $i$  conecta al nodo  $j$  y viceversa.

El grado de los nodos de una red está íntimamente ligado con una propiedad muy importante de la misma: *la distribución de grado*  $p_k$ . Esta distribución forma parte de la caracterización de cualquier red y el conocerla es el primer paso para entender sus propiedades y el tipo de red que se está estudiando. Se define como:

$$p_k = \frac{N_k}{N} \quad (4)$$

donde  $N_k$  es el número de nodos con grado  $k$ . Por otro lado, para una red dirigida, los grados de entrada y salida son diferentes entre sí, lo que implica que las distribuciones de grado también se dividen en *distribución de grado de entrada*  $p_k^{in}$  y *distribución de grado de salida*  $p_k^{out}$ . Para obtener las distribuciones de los grados de entrada y salida basta con seguir la ecuación (4) pero sustituyendo el numerador por  $N_k^{in}$  o  $N_k^{out}$ , respectivamente.

Finalmente, un dato que puede esclarecer la conectividad de una red, es *el grado promedio de los vecinos* del nodo  $i$  ( $k_{neig}$ ) que, como su nombre indica, toma el valor del grado de cada nodo conectado a  $i$ . Este valor se suele promediar para todos los nodos presentes en la red con el propósito de ver una parte de su conectividad y asignándosele la variable  $\langle k_{neig} \rangle$ .

### 2.1.3. Caminos y distancias

Para una red, el concepto de distancia que se utiliza en la vida diaria será reemplazado por *la longitud de camino*. Donde un camino será una ruta a lo largo de todos los enlaces en una red y la longitud de este camino será el número de enlaces contenidos en él. El cambio conceptual se hace para encontrar otra propiedad importante, llamada *el camino más corto entre los nodos  $ij$*  ( $d_{ij}$ ). Este valor cambiará para una red dirigida y una no dirigida, es decir,  $d_{ij} = d_{ji}$  para una red no dirigida, pero  $d_{ij} \neq d_{ji}$  para una red dirigida. De hecho, la existencia de un camino  $d_{ij}$  en una red dirigida, no implica la existencia de un camino  $d_{ji}$ . Se puede usar el camino más corto para obtener información acerca del *diámetro de la red* ( $d_{max}$ ), que se define como el mayor de los caminos más cortos que puede haber entre dos nodos cualesquiera.

Finalmente, se denomina como *conexa* a una red donde  $d_{ij}$  está bien definido para cualquier par de nodos, es decir, es posible encontrar por lo menos un camino entre cualquier par de nodos  $ij$ . Por otro lado, una red será *no conexa* si tuviera al menos un par de nodos con  $d_{ij} = \infty$ , es decir, que no es posible establecer un camino entre los nodos  $ij$  dentro de la red. Esto daría lugar a la presencia de *componentes*, que son “fragmentos de red” con todos sus nodos conectados pero que están separados del componente más grande.

#### 2.1.4. Conectividad

Las medidas de conectividad muestran el grado en que los nodos se relacionan entre ellos. Un factor importante de estas medidas es el *coeficiente de agrupamiento local* ( $C_i$ ) que representa el grado en el que los vecinos de un nodo  $i$  con grado  $k_i$ , están conectados unos a otros. Se define como:

$$C_i = \frac{2L_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (5)$$

siendo  $L_i$  el número de enlaces entre los  $k_i$  vecinos del nodo  $i$ . El coeficiente de agrupamiento toma valores entre cero y uno, donde  $C_i = 0$  significa que ninguno de los vecinos de  $i$  está conectado a los demás y,  $C_i = 1$  implica que todos los vecinos de  $i$  están conectados entre sí. En otras palabras,  $C_i$  será la probabilidad de que exista una conexión entre cualesquiera dos vecinos del nodo  $i$ . Por otro lado, el grado de agrupamiento de toda la red será  $\langle C \rangle$  y representa la probabilidad de que dos vecinos de un nodo aleatorio estén conectados. Éste se define como:

$$\langle C \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \quad (6)$$

Otro valor de gran importancia en los cálculos de conectividad es la *cercanía de un nodo*  $C_{cen}^i$ . Este valor está relacionado con qué tan cerca está un nodo de todos los demás, se define como:

$$C_{cen}^i = \frac{1}{\sum_j d_{ij}} \quad (7)$$

donde  $d_{ij}$  es el camino más corto entre los nodos  $ij$ . Se puede observar que mientras más grande sea la cercanía de un nodo, más cerca estará éste de todos los demás. Al igual que las propiedades antes descritas, es común calcular *el valor promedio de la cercanía* ( $C_{cen}$ ).

Finalmente, la *intermediación de un nodo* ( $B_i$ ), arroja información acerca de la importancia del nodo, cuantificando el número de caminos más cortos que pasan a través de él. Se calcula mediante la expresión:

$$B_i = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{\sigma_{j,k}^i}{\sigma_{j,k}} \quad (8)$$

donde  $\sigma_{j,k}^i$  representa al número de caminos más cortos que pasan a través del nodo  $i$  y unen a cualesquiera dos nodos en la red y el valor de  $\sigma_{j,k}$  corresponde al número total de caminos más cortos que existen entre cualquier par de nodos en la red.

## 2.2. Redes duales

Como ya se había mencionado en las secciones anteriores, en las redes viales, una red primaria es aquella donde las calles son representadas como enlaces y las intersecciones entre ellas como nodos. Sin embargo, existe un enfoque diferente que también arroja información de la red vial: la representación dual de una red. Una red dual es aquella en la que los nodos representan a las calles y los enlaces representan a las intersecciones entre ellas. Existe un problema común que genera debate entre los investigadores y es que, antes de convertir a una calle como un nodo en la representación dual, se tiene que identificar a dicha calle como la “misma” calle a lo largo de toda la red vial. Se han generado diversos modelos para afrontar estos dilemas, siendo el más antiguo de ellos la *sintaxis espacial* (Hillier & Hanson, 1984), donde una calle será cualquier espacio recto donde puede haber movimiento ininterrumpido. Entonces, un nodo en la red dual será cualquier línea que cumpla con el requerimiento anterior y los enlaces en la red, serán las intersecciones entre dichas líneas. Si bien este modelo da lugar a una red dual, ha

sido criticado por la gran subjetividad de su proceso de construcción, su dificultad para explicar consistentemente algunas configuraciones geométricas y su distanciamiento de la vida real (Batty, 2004; Crucitti, Latora, & Porta, 2006; Jiang & Claramunt, 2002). Por otro lado, un modelo más reciente es el de *Negociación de continuidad en la intersección* (Porta et al., 2006) donde una calle será aquella línea recta que, conforme pasa las intersecciones, conserva el mayor ángulo convexo entre ella y la calle con la que colinda. Finalmente, un modelo más ajustado al utilizado en este trabajo es el denominado *enfoque de calles con mismo nombre* que como su nombre indica, utiliza como principio de continuidad el nombre de la calle (Jiang & Claramunt, 2004). Este último enfoque se utilizó para este trabajo, ya que el nombre de las calles está contenido en los archivos utilizados para la obtención de las redes. Entonces, para la construcción de las redes duales descritas en este trabajo, se consideró como la “misma” calle a aquella que tuviera el mismo nombre a lo largo de su extensión física y se representó mediante un nodo. Los enlaces entre los nodos duales, fueron las intersecciones que hubiera entre calles que tuvieran nombres diferentes.

El análisis de una red dual, se hace utilizando las mismas ecuaciones utilizadas para las redes aleatorias y la interpretación de los valores obtenidos será la misma. Sin embargo, dado que en la red dual las calles son convertidas en nodos, su longitud métrica carece de importancia, lo que implica que la red dual es comparable en su estructura con otras redes en las que  $k$  no depende de la disponibilidad de espacio geográfico. Lo anterior conduce, por ejemplo, al reconocimiento de la propiedad libre de escala en las distribuciones de grado de dichas redes (Porta et al., 2006).

### **2.3. Modelos de redes**

Al igual que muchos sistemas complejos, las redes son estudiadas mediante modelos matemáticos que, si bien no describen de manera perfecta al sistema y su evolución, forman herramientas que permiten su descripción y comprensión. En las siguientes secciones se muestran los dos modelos más relevantes para este trabajo y sus respectivas características.

### 2.3.1. Redes aleatorias

Una *red aleatoria*, puede generarse fijando el número de nodos totales  $N$  y una *probabilidad de enlace*  $P$ . Después, se seleccionan un par de nodos  $i, j$ , se genera un número aleatorio  $z$  ( $0 \leq z \leq 1$ ) y, si  $z \geq P$ , entonces se enlazan los nodos. El proceso anterior se repite para todos los  $N(N - 1)/2$  pares de nodos presentes en la red. El grado promedio para una red aleatoria depende de  $P$  y se expresa como:

$$\langle k_{al} \rangle = P(N - 1) \quad (9)$$

Por otro lado, la distribución de grado en una red aleatoria se expresa como:

$$p_k = \binom{N - 1}{k} p^k (1 - P)^{N - 1 - k} \quad (10)$$

Esta ecuación es la distribución binomial, donde el primer término entre paréntesis representa las formas en que se pueden asignar  $k$  de los  $N - 1$  enlaces posibles entre los nodos. El segundo término será la probabilidad de que existan estos  $k$  enlaces y el tercer, y último término, será la probabilidad de que los  $N - 1 - k$  enlaces faltantes estén presentes.

En la práctica, el uso de la distribución binomial es muy complicado, y se prefiere el uso de la distribución Poisson, que tiene las mismas características, pero depende únicamente del grado promedio. Esta distribución se define como:

$$p_k = e^{-\langle k_{al} \rangle} \frac{\langle k_{al} \rangle^k}{k!} \quad (11)$$

donde  $\langle k_{al} \rangle$  es el grado promedio de la red aleatoria. Esta ecuación es válida cuando  $N \gg \langle k_{al} \rangle$  y tiene la ventaja de que no depende de  $N$  ni de  $P$ . La condición anterior se cumple para casi todas las redes reales, debido a que son ralas y el número de nodos es mucho más grande que su grado promedio. La comparación entre las distribuciones de grado Poisson y Binomial se muestra en la *Figura 2*.

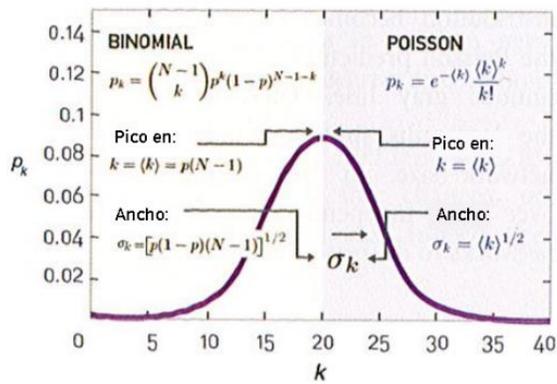


Figura 2. Comparación entre la distribución binomial y Poisson donde se observa que comparten las mismas propiedades. [Barabási, A. (2016). *Binomial vs. Poisson Degree Distribution*. [Figure 3.4]. Modificado de <http://networksciencebook.com/chapter/3#degree-distribution>]

Una característica de suma importancia en las redes aleatorias, es que el valor que se asigna a la probabilidad de enlace  $P$  tiene un impacto sobre la red y sus componentes. Así, se definen cuatro regímenes que se describen a continuación:

**(i) Régimen Subcrítico**  $0 \leq \langle k_{al} \rangle \leq 1; P < 1/N$ :

En este régimen se observan muchos nodos aislados, es decir, sin conexiones entre ellos. Los pocos que se encuentran conectados tienen estructuras tipo árbol y, cualquiera de ellos podría designarse como el componente más grande de la red. Sin embargo, el tamaño relativo de este componente aún es cero ( $N_g/N \rightarrow 0$ ) por lo que, en este régimen, la red está formada de muchos pequeños componentes de tamaños comparables.

**(ii) Punto Crítico**  $\langle k_{al} \rangle = 1; P = 1/N$ :

En este punto, el tamaño del componente más grande será  $N_g \sim N^{2/3}$ . Sin embargo, el tamaño relativo de este componente  $N_g/N$  sigue siendo cercano a cero. Es importante mencionar que el tamaño del componente más grande en este punto es órdenes de magnitud más grande que el tamaño encontrado en el régimen subcrítico. Dicho componente coexiste con muchos componentes de diversos tamaños donde casi todos éstos están en forma de árboles.

**(iii) Régimen supercrítico**  $\langle k_{al} \rangle > 1; P > 1/N$ :

Las redes reales que se pueden comparar con una aleatoria, se encuentran en este régimen. Aquí, el componente gigante coexiste con muchos componentes aislados que son más pequeños que él. En las vecindades del valor crítico  $N_g \sim (P - 1/N)N$ .

**(iv) Régimen Conexo**  $\langle k_{at} \rangle > \ln N; P > \ln N/N$ :

A partir de estos valores de grado promedio y probabilidad de enlace, la red se vuelve conexa y el componente gigante absorbe todos los nodos, entonces  $N_g = N$ .

Una gran desventaja del modelo de redes aleatorias es que subestima la presencia de nodos con una gran cantidad de enlaces, descritos en la literatura como “*nodos concentradores*”. Estos concentradores están presentes en casi todas las redes reales y modifican drásticamente sus distribuciones de grado, dando lugar a un fenómeno conocido como *mundo pequeño*. Dicho fenómeno se refiere al hecho de que la distancia promedio entre dos nodos cualesquiera de una red  $\langle d \rangle$ , es órdenes de magnitud más pequeña que el tamaño de la red, es decir  $\langle d \rangle \ll N$ . En una red aleatoria, se encuentra que  $\langle d \rangle \sim \ln N / \ln \langle k \rangle$  es decir que, mientras más densa sea la red, más pequeña será la distancia entre dos nodos elegidos de manera aleatoria. El fenómeno de mundo pequeño tiene implicaciones interesantes en la vida real: en un estudio se realizó el primer mapeo de la red social de Facebook ( $N \approx 721 \times 10^6$ ) y se encontró que la distancia promedio entre dos amigos cualesquiera es 3.74 intermediarios (Boldi & Vigna, 2012). Aunque el fenómeno de mundo pequeño está presente en muchas redes reales, éste no sigue la expresión matemática  $\langle d \rangle \sim \ln N / \ln \langle k \rangle$ , si no que, como se verá más adelante, la presencia de los nodos concentradores repercute seriamente sobre las distancias promedio.

Finalmente, se pueden obtener dos predicciones importantes del modelo aleatorio: La primera es que cuando  $\langle k \rangle > 1$ , existe un componente gigante que incluye una fracción finita de todos los nodos y coexiste con componentes más pequeños. Este fenómeno está presente en muchas redes reales. La segunda predicción es que cuando  $\langle k \rangle > \ln N$ , el componente gigante debería de absorber todos los componentes de la red. Sin embargo, este fenómeno no es recurrente en las redes reales, lo que implica que las redes reales no son completamente aleatorias y es probable que tengan características de diferentes modelos.

### 2.3.2. Redes libres de escala

Estas redes tienen una distribución de grado que sigue una ley de potencias de la forma  $P_k \sim k^{-\gamma}$  donde  $\gamma$  se conoce como el exponente de grado; en las redes reales suele tener el valor  $2 \leq \gamma \leq 3$  (Figura 3). Al igual que en los casos anteriores, el hecho de que haya redes dirigidas afecta a las distribuciones de grado, volviéndolas de entrada y de salida y distintas entre sí, es decir que  $P_k^{in} \sim k^{-\gamma_{in}} \neq P_k^{out} \sim k^{-\gamma_{out}}$ . Una diferencia que existe entre las redes libres de escala y las aleatorias, es que en las libres de escala se permite la presencia de los nodos concentradores, lo que las vuelve un excelente candidato para modelar las redes reales.

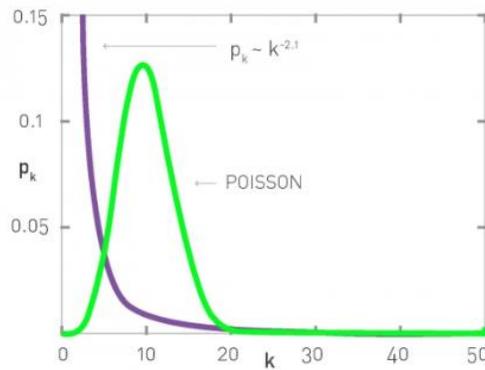


Figura 3. Comparación entre la distribución Poisson y la distribución de grado libre de escala. Se hizo la comparación para dos redes con  $N = 50$  y  $\langle k \rangle = 11$ ; la red libre de escala tiene  $\gamma = 2.1$ . [Barabási, A. (2016). *Poisson vs. Power Law Distribution*. [Figure 4.4]. Recuperado de <http://networksciencebook.com/chapter/4#hubs>]

El término libre de escala, proviene del hecho de que si bien  $\langle k \rangle$  arroja información acerca del grado promedio,  $\langle k^2 \rangle$  y  $\langle k^3 \rangle$  dan, respectivamente, información acerca del esparcimiento en los grados y la simetría de la distribución de grado alrededor de  $\langle k \rangle$ . De hecho, el  $n$ -ésimo momento de una red de este estilo será:

$$\langle k^n \rangle = C \frac{k_{max}^{n-\gamma+1} - k_{min}^{n-\gamma+1}}{n - \gamma + 1} \quad (12)$$

donde el valor del grado para el nodo concentrador más grande ( $k_{max}$ ), depende del tamaño de la red de la forma  $k_{max} \sim N^{\frac{1}{\gamma-1}}$  y  $C$  es una constante de normalización. El valor de  $k_{min}$  representa el grado mínimo que pueda tener la red y, usualmente, será un valor fijo. Si se analiza el caso asintótico de una red muy grande, donde  $k_{max} \rightarrow \infty$ , el  $n$ -ésimo momento estará definido cuando  $n - \gamma + 1 \leq 0$ . Sin embargo, cuando  $n - \gamma + 1 \geq 0$ , el  $n$ -ésimo momento diverge y será imposible encontrar valores tales

como la varianza en el grado de una red libre de escala. Esto se traduce a que, si se elige al azar un nodo, éste puede tener un grado gigantesco o uno muy pequeño: Por ejemplo, en una red aleatoria  $k = \langle k \rangle \pm \sigma_k$ , donde  $\sigma_k = \langle k \rangle^{\frac{1}{2}}$ ; es decir que casi todos los nodos tendrán un grado “comparable” y  $\langle k \rangle$  sirve como la “escala” de la red. Sin embargo, si no es posible encontrar  $\sigma_k$  (como es el caso de estas redes), la red carece de “escala” interna y se denomina como una red *libre de escala*. Por otro lado, desde el aspecto físico el término es mucho más sencillo de entender, ya que si  $p_k = \alpha k^{-\gamma}$  el factor de escala  $\alpha$  podría tomar diversos valores; sin embargo, bastaría con renormalizar la distribución de grado, lo que dejaría intacto el valor responsable del decaimiento exponencial de la distribución que es  $\gamma$ .

Como se mencionó en la sección anterior, la presencia de los nodos concentradores tiene un impacto sobre la distancia promedio que hay entre dos nodos cualesquiera en una red libre de escala. Similarmente a las redes aleatorias, se pueden distinguir tres regímenes en los que el exponente de grado  $\gamma$  modifica la distancia promedio entre los nodos. Estos regímenes son:

**(i) Régimen anómalo  $\langle d \rangle \sim cte; \gamma = 2$ :**

De la expresión  $k_{max} \sim N^{\frac{1}{\gamma-1}}$  vemos que si  $\gamma = 2$ , el tamaño del concentrador más grande, depende linealmente con el tamaño de la red. Esto forzaría a la red a tener una configuración de estrella en la que los nodos están cerca unos de otros porque están conectados al mismo concentrador central. Sin embargo, para  $\gamma < 2$ , esta configuración no es posible ya que el exponente de N será mayor a uno, es decir, que el concentrador más grande, debería de contener más nodos que los existentes. Claramente esto no es posible, lo que implica que no hay redes libres de escala donde  $\gamma < 2$ .

**(ii) Régimen de ultra mundo pequeño  $\langle d \rangle \sim \ln(\ln N); 2 < \gamma < 3$ :**

En este régimen, la presencia de los nodos concentradores reduce radicalmente el camino entre dos nodos cualesquiera mediante el enlazamiento del nodo concentrador más grande con los nodos de grados más pequeños. La fracción de

nodos que conectan al concentrador más grande será:  $\frac{k_{max}}{N} \sim N^{-\left(\frac{\gamma-2}{\gamma-1}\right)}$ . Todas las redes reales que son libre de escala, se encuentran en este régimen.

### (iii) Régimen de red aleatoria y punto crítico:

Aquí  $\langle d \rangle \sim \ln N / \ln \ln N$  cuando  $\gamma = 3$  y  $\langle d \rangle \sim \ln N$  cuando  $\gamma > 3$  donde las propiedades de una red libre de escala y la de una red aleatoria son indistinguibles.

En conclusión, una red será libre de escala si su distribución de grado sigue una ley de potencias de la forma  $P_k \sim k^{-\gamma}$  donde  $\gamma < 3$  implica que la red no tiene escala interna. Este modelo de redes, admite la presencia de los nodos concentradores y éstos minimizan la distancia promedio entre dos nodos cualesquiera presentes en la red, dando lugar al fenómeno de ultramundo pequeño. Todas las redes reales que son libre de escala se encuentran en el régimen de ultra mundo pequeño.

Finalmente, si se desea saber más a fondo de este o de los otros temas, se puede encontrar información más detallada de esta y las secciones anteriores en el libro **Network Science** de Albert-László Barabási que se puede encontrar en la página <https://barabasi.com/book/network-science>; así como también se recomienda leer el libro **Networks, an Introduction** de M. E. J. Newman para una visión más profunda acerca de las redes.

### 3. Metodología para la Obtención y Caracterización de Redes

En el **Apéndice A** se muestran las 42 colonias de la Ciudad de México que fueron seleccionadas para su análisis en este trabajo. Como ya se había mencionado en las secciones anteriores, se utilizó la librería OSMnx (Copyright© 2020, Geoff Boeing Revision e05ccb77) de Python, que permite la extracción y caracterización de una red vial desde una región determinada. Dicha región puede definirse mediante coordenadas de latitud y longitud, nombre de la ciudad o mediante un archivo .shp o *shape*. En el portal de datos abiertos de la Ciudad de México, se pueden obtener los archivos .shp para cada colonia y cada alcaldía, lo que resultó extremadamente útil para este trabajo (<https://datos.cdmx.gob.mx/pages/home/>). A continuación, los archivos se modificaron mediante el programa de libre acceso QGIS (Copyright © 1989, 1991 Free Software Foundation, Inc. 59 Temple Place - Suite 330, Boston, MA 02111-1307, USA) con el propósito de abarcar toda la red vial que estuviera dentro de los límites marcados. Una vez delimitada el área, OSMnx permite extraer la red primaria de las vialidades incluidas en el perímetro. Sin embargo, es necesario limpiar la red obtenida, ya que contiene nodos y enlaces que están presentes para dar curvatura a las calles o que forman parte de una glorieta (en una glorieta muchas calles intersecan en el mismo punto, pero OSMnx agrega enlaces como si hubiera varias intersecciones). La *Figura 4* muestra el proceso de obtención de las redes, la limpieza y sus resultados.

Una vez limpias las redes de las colonias y alcaldías, se obtuvieron las distribuciones de grado de las redes primarias para todas ellas. Dado que estas redes son multigrados, se graficaron las distribuciones de grado de entrada y salida para poder entender el tipo de red con que se está trabajando (*Figura 5*). Después, OSMnx posee las herramientas necesarias para calcular los valores relacionados con la topología de la red, tales como nodos totales  $N$ , enlaces totales  $L$ , grado promedio  $\langle k \rangle$ , promedio de longitud de calle  $S_{lgt}$ , media del grado promedio de los vecinos  $\langle k_{neig} \rangle$ , grado de agrupamiento de la red  $\langle C \rangle$ , el valor promedio de la intermediación  $\langle B \rangle$ , el diámetro de la red  $d_{max}$  y el promedio de la cercanía de los nodos  $\langle C_{cen} \rangle$ . Todos estos datos se pueden observar en el **Apéndice B**.

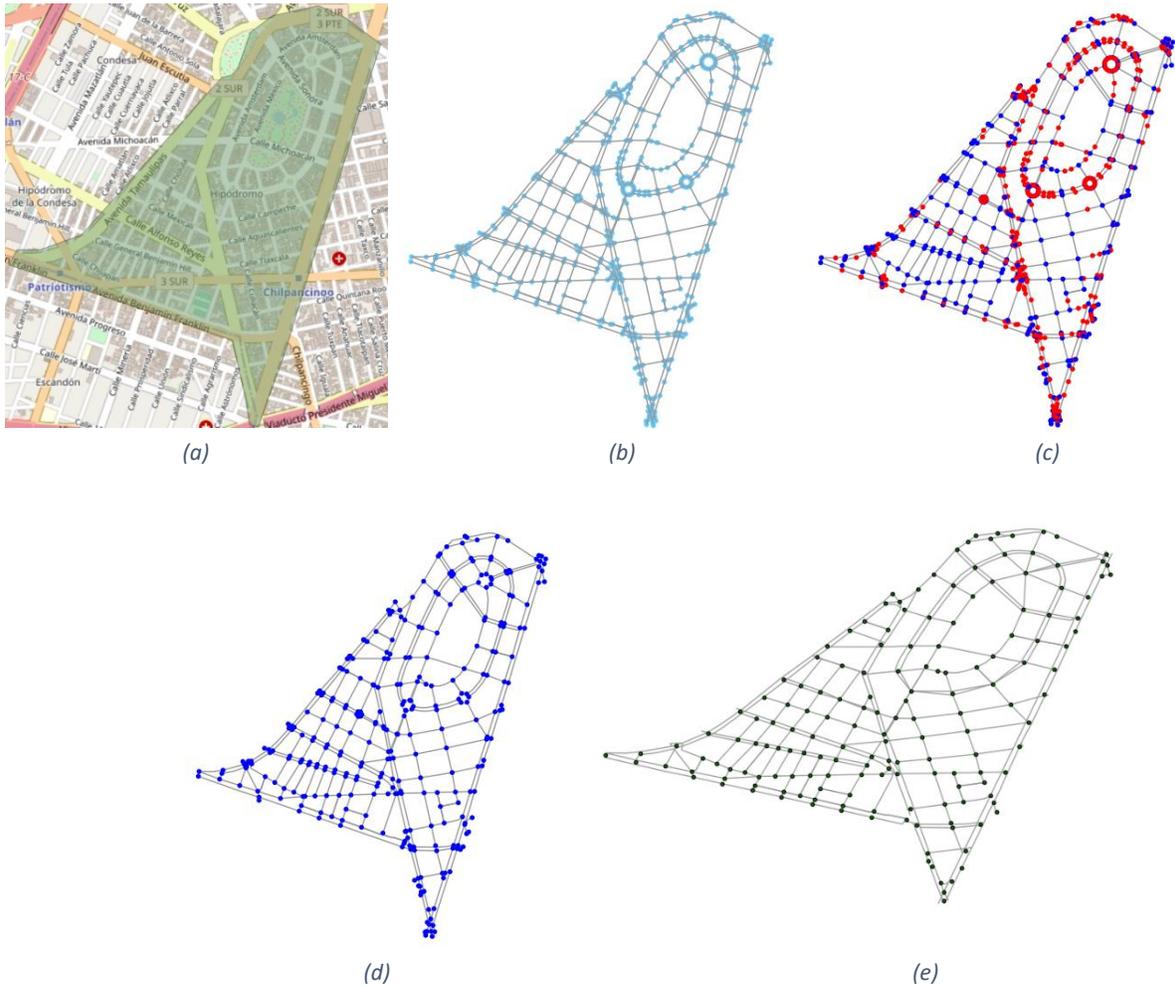


Figura 4. Obtención y simplificación de redes primarias para la colonia Hipódromo en la Ciudad de México. a) Delimitación del área a estudiar mediante el archivo .shp y QGIS. b) Red primaria antes de la limpieza utilizando OSMnx. c) Se muestran en rojo los nodos a limpiar. d) Se muestra la red limpia, aunque se observa que, en la glorieta ubicada en la parte superior, muchas calles inciden en el mismo punto y éste no está representado como un solo nodo, lo que requiere una corrección. e) Se muestra la red corregida, con la glorieta unida en un solo nodo. También se observa que la topología de la red original, no se ve modificada por la limpieza de las redes.

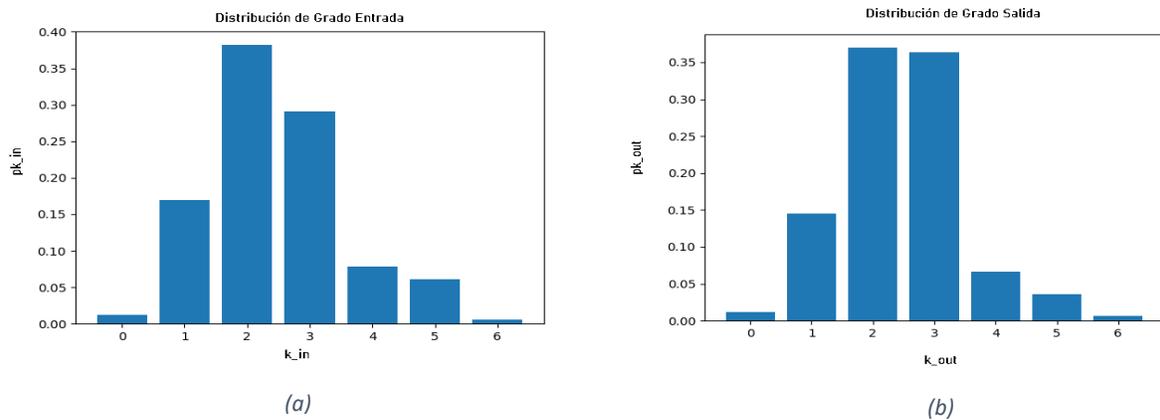


Figura 5. Distribuciones de entrada (a) y salida (b) para la colonia Hipódromo en la Ciudad de México. Se observa que ambas distribuciones asemejan una distribución Poisson con el pico alrededor de 2.50 (Figura 2).

Una vez finalizada la obtención y caracterización de las redes primarias, se obtuvieron las redes duales de las colonias usando los mismos archivos .shp que para las primarias; esto con el propósito de mapear la misma red y tener la certeza de estar obteniendo la red dual correspondiente. Como principio de continuidad se utilizó el nombre de las calles, es decir, que una calle será convertida en un nodo en la red dual siempre que mantenga el mismo nombre. Esto fue posible ya que la información extraída por OSMnx y suministrada por OpenStreetMaps (un servicio de datos de acceso libre y que opera con licencia ODbL (Open Data Commons Open Data Base License) de la Fundación OSM), detalla la ubicación geográfica de los cruces, así como extensión, nombre, tipo de calle (primaria, secundaria, terciaria, etc.) y otros atributos de los segmentos de calle. Cabe mencionar que estas redes duales ya no son dirigidas, dado que se incluyen ambos sentidos de la calle en un solo nodo y, por lo tanto, formarán un grafo no dirigido caracterizado por una sola distribución de grado que será diferente a las distribuciones de grado entrada y salida en la red primaria (Figura 6). Al igual que las redes primarias, las redes duales se caracterizaron mediante la obtención de datos topológicos como los nodos totales  $N_d$ , enlaces totales  $L_d$ , grado promedio  $\langle k_d \rangle$ , media del grado promedio de los vecinos  $\langle k_{neig}^d \rangle$ , grado de agrupamiento de la red  $\langle C_d \rangle$ , el valor promedio de la intermediación  $\langle B_d \rangle$ , el diámetro de la red  $d_{max}^d$  y el promedio de la cercanía de los nodos  $\langle C_{cen}^d \rangle$ . Todos los datos obtenidos se encuentran en el **Apéndice C**.

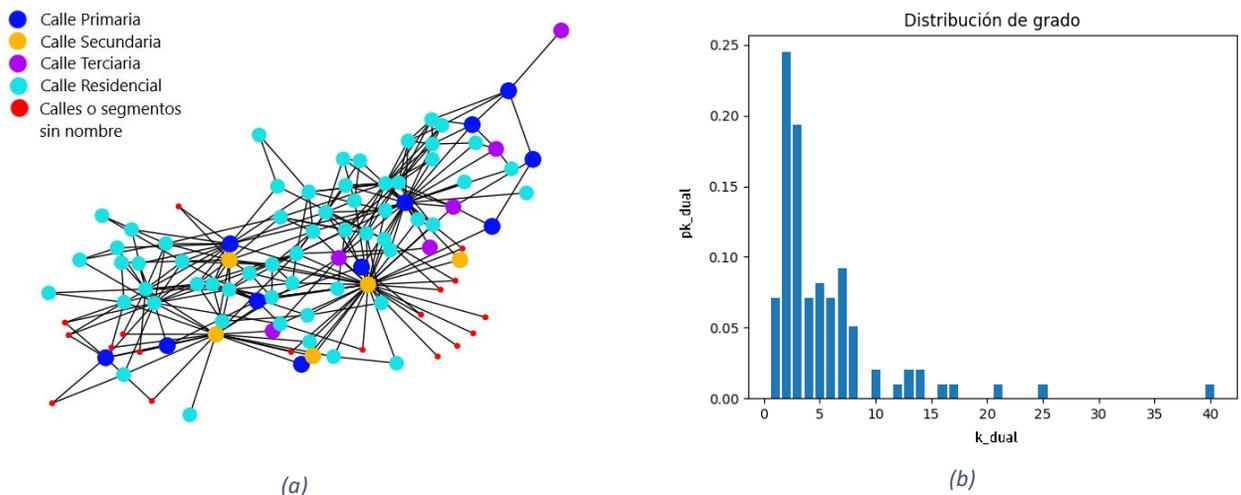


Figura 6. Red Dual y Distribución de Grado. a) Red dual de la colonia Hipódromo, calles con el mismo nombre son nodos y sus intersecciones son enlaces. Los nodos azules identifican a calles consideradas primarias, naranja calles secundarias, púrpura calles terciarias, cian calles residenciales y rojo calles cerradas o segmentos sin nombre de calles que representan conexiones entre diferentes vías. Esta red tiene  $N_d = 98$  y  $L_d = 265$  que son valores significativamente menores comparados con los  $N = 165$  y  $L = 406$  de la red primaria concerniente a la misma colonia. b) Distribución de grado de la red dual.

Por otro lado, los índices de ira utilizados en este trabajo fueron obtenidos por Hernández-Hernández *et al.* (2019) mediante la aplicación de una versión modificada de la encuesta de *Escala de Ira al Volante (Driving Anger Scale, DAS)* desarrollada por Deffenbacher *et al.* (1994) que mide el nivel de ira de los conductores a las obstrucciones viales, la descortesía en el camino, la infracción de las leyes de tránsito y la conducción lenta por parte de otros automovilistas. Previo al uso de la encuesta DAS, los participantes brindan información personal como lugar de residencia y trabajo, edad, género y horas usuales de manejo. Posteriormente, responden la escala DAS modificada que consta de una serie de 20 preguntas con situaciones hipotéticas donde califican en una escala del 1 al 5 los niveles de ira que sentirían en caso de verse involucrados en dichas situaciones. Cabe mencionar que la DAS ha sido utilizada y validada a lo largo de más de veinte años en países muy diferentes como lo son Japón, China, España, Nueva Zelanda, Finlandia, Países Bajos y el Reino Unido (Lajunen, Parker, & Stradling, 1998; Li, Yao, Jiang, & Li, 2014; McLinton & Dollard, 2010; Parker, Lajunen, & Summala, 2002; Sullman, 2006) y también que, aunque la DAS es una forma de medir los niveles de ira al volante que sufren los conductores, existen otras escalas que buscan medir la forma en que los automovilistas *expresan* la ira que sienten; por ejemplo, el *Inventario de Expresión de Ira (Driving Expression Inventory o DAX)*, el *Índice de Conducción Peligrosa de Dula (Dula Dangerous Driving Index o DDDI)* y la *Escala de Propensión a la Ira (Propensity for Driving Anger Scales o PADS)* (Jerry L. Deffenbacher, Lynch, Oetting, & Swaim, 2002; DePasquale, Geller, Clarke, & Littleton, 2001; Dula & Ballard, 2003; Galovski & Blanchard, 2004). Las últimas escalas no se usaron en este trabajo ya que las expresiones de ira al volante servirían para otro tipo de estudio como podría ser un modelo de programación basada en agentes en donde dichas expresiones formarían parte de la toma de decisiones de los agentes que se mueven en la red vial.

En cuanto a las correlaciones entre los datos de DAS disponibles y los datos topológicos obtenidos, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson  $\Gamma_{xy}$  que se define como:

$$\Gamma_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (12)$$

donde  $S_{xy}$  es la covarianza entre las variables  $x$  e  $y$ ,  $S_x$  es la covarianza de  $x$  y  $S_y$  es la covarianza de  $y$ . Este coeficiente permite conocer qué tan fuerte es la relación lineal entre dos conjuntos de variables donde  $\Gamma_{xy} = -1$  representa una correlación lineal inversa perfecta entre  $x$  e  $y$  mientras que  $\Gamma_{xy} = 1$  representa una correlación lineal perfecta entre  $x$  e  $y$ . Los resultados suelen expresarse en una *matriz de correlaciones* para observar las correlaciones entre cada una de las variables involucradas. Un valor considerado como una correlación aceptable es  $|\Gamma_{xy}| \geq 0.7$ .4.

## 4. Resultados y discusiones

### 4.1. Distribuciones de grado de las colonias

En el **Apéndice B** se muestran los resultados obtenidos para los distintos parámetros de las redes primarias de las 42 colonias analizadas de la Ciudad de México. En el enfoque primario, algunas de las colonias presentan distribuciones de grado similares a una distribución Poisson. Los casos más notorios son los de las colonias Letrán Valle, Navarrete, Ciudad Jardín, Hipódromo, Agrícola Oriental y Romero Terrero. Sus respectivas distribuciones se muestran en la *Figura 7*. Las seis redes anteriores coincidirían con la descripción de una red aleatoria en el régimen supercrítico ya que, para todas ellas  $1 < \langle k \rangle < \ln N$  y se esperaría encontrar un componente gigante que estaría coexistiendo con muchos componentes aislados. Sin embargo, los análisis necesarios para tener certeza de que estas redes son aleatorias (por ejemplo, la medición de los tamaños de los componentes gigantes de las redes buscando concordancia entre los tamaños obtenidos y los esperados en el régimen supercrítico o la obtención del grado el que las distribuciones se asemejan a una Poisson) están fuera del marco de trabajo de esta tesis.

El resto de las redes no parecen presentar una distribución de grado que se asemeje a una red aleatoria o a una red libre de escala, algunos ejemplos son las colonias Reforma Política, Portal Santo Domingo y San Andrés Tetepilco (*Figura 8*). Lo anterior se puede deber a que dichas redes contienen gran cantidad de calles cerradas donde éstas son representadas mediante un solo enlace con un solo nodo lo que daría como resultado un pico en la distribución de grado en  $k_{in} = 1$ ; también, se observa que gran parte de estas calles cerradas conectan con una sola calle

principal, donde la intersección entre la calle cerrada y la principal se representa mediante un nodo y tres enlaces, lo que explicaría el pico en  $k_{in} = 3$ . Estas colonias también tienen una forma casi cuadrícula en sus redes, lo que implicaría que las distribuciones de grado no serán semejantes a ningún modelo (aleatorio o libre de escala).

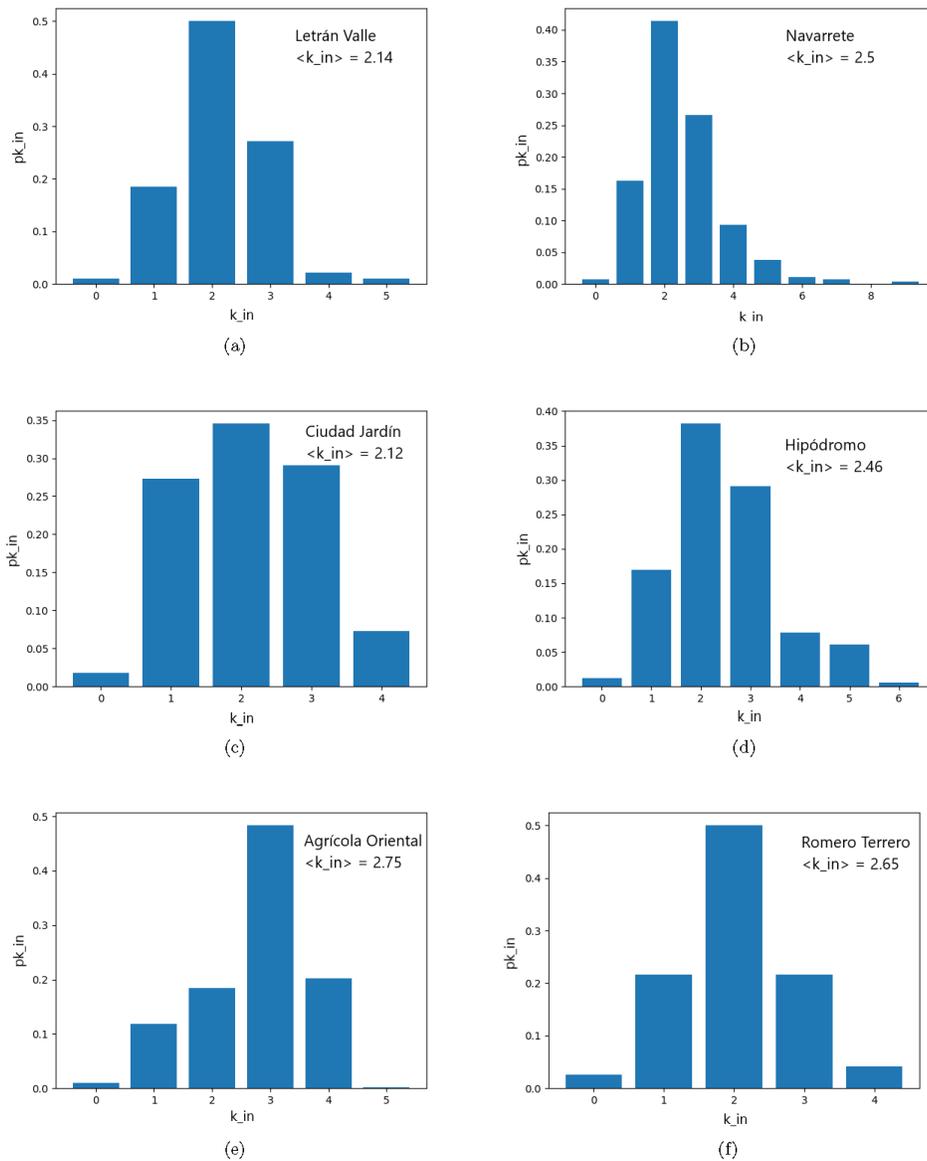


Figura 7. Distribuciones de grado similares a Poisson. Se observa que estas distribuciones, correspondientes a seis colonias de la Ciudad de México, se asemejan a una distribución Poisson con sus picos variando entre los valores  $k_{in} = 2$  y  $k_{in} = 3$ .

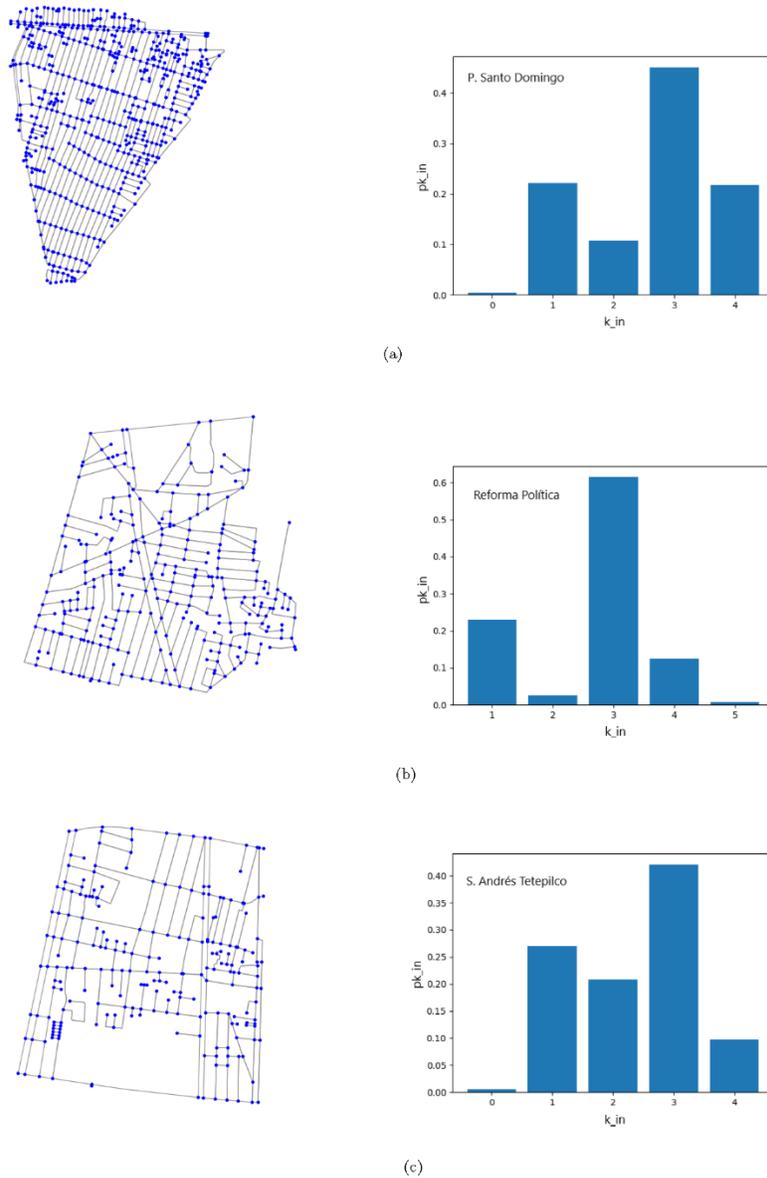
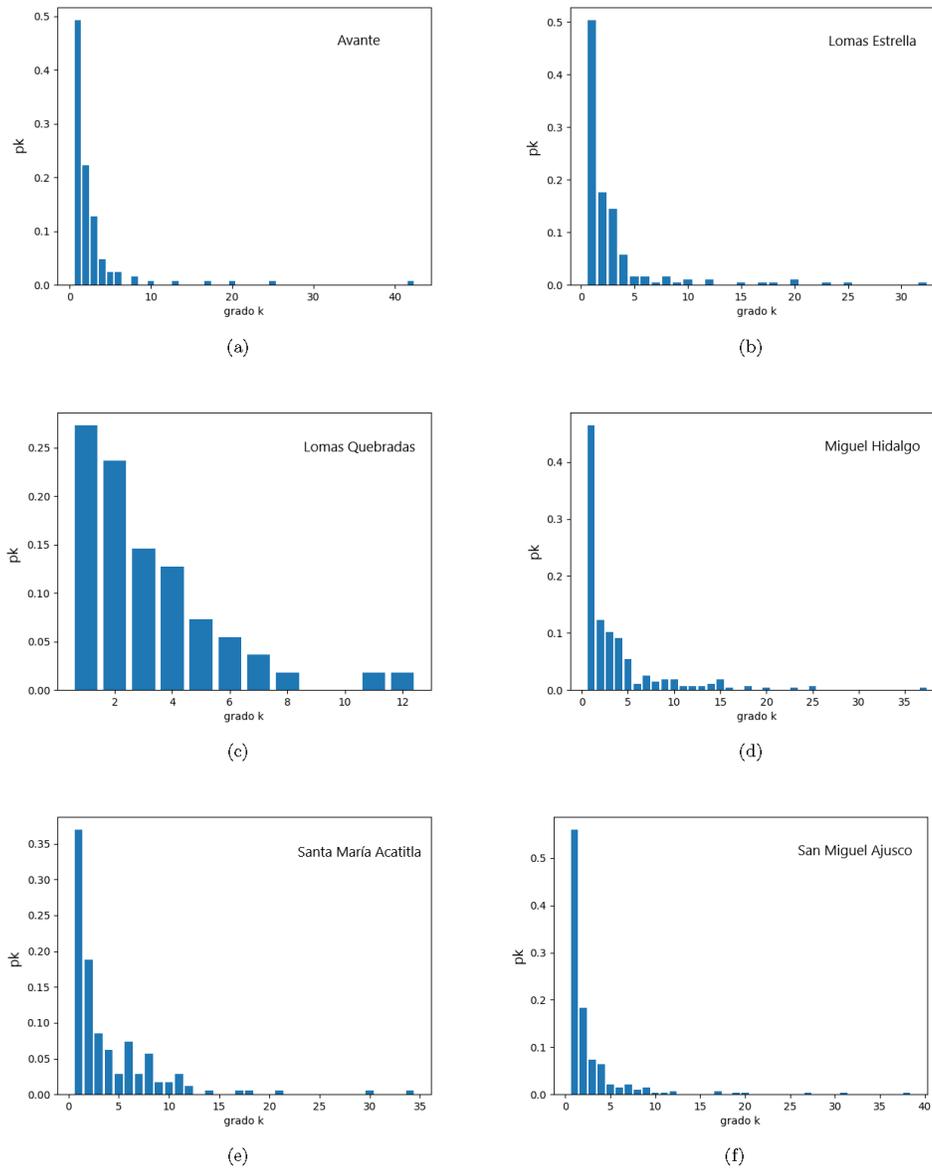


Figura 8. Redes primarias y distribuciones de grado cuyas Propiedades no Corresponden a Ningún Modelo. (a) Colonia Reforma Política. (b) Colonia Portal Santo Domingo. (C) Colonia San Antonio Tetepilco. Se observa que las colonias tienen muchas calles cerradas que conectan a una sola calle; también se puede apreciar que sus respectivas calles están conectadas de manera muy similar a como si estuvieran en una cuadrícula.

Por otro lado, los resultados obtenidos para los distintos parámetros de las redes duales de las 42 colonias, se encuentran en el **Apéndice C**. Bajo el enfoque dual, las distribuciones de grado de casi todas las redes son similares a una distribución libre de escala, hecho que está ampliamente reportado en la literatura (Batty, 2004; Crucitti et al., 2006; Jiang & Claramunt, 2002, 2004; Porta et al., 2006). Los casos más notorios de dichas similitudes son las colonias Avante, Lomas Estrella, Lomas

Quebradas, Miguel Hidalgo, Santa María Acatitla y San Miguel Ajusco; sus distribuciones se muestran en la *Figura 9*.



*Figura 9. Distribuciones de grado para las redes duales de seis colonias de la Ciudad de México. Estas redes presentan un decaimiento similar al que se obtiene en las redes libres de escala.*

## 4.2. Datos topológicos de las colonias y matrices de correlación

Además de la comparación de las distribuciones de grado con los diferentes modelos de redes, se caracterizaron las redes de manera cuantitativa calculando

sus valores topológicos. Las *Tablas 1 y 2* muestran los valores obtenidos en el enfoque primario y dual las colonias Agrícola Oriental, Ciudad Jardín, Hipódromo, Letrán Valle, Navarrete y Romero Terreiro. En estas tablas se aprecia el cambio radical entre los valores obtenidos en el enfoque primario y dual. Valores como el número de nodos  $N$  y enlaces  $L$  son más del doble de grandes en el enfoque primario que en el dual, es decir que las redes duales son mucho más pequeñas en tamaño. También se observa que la media del grado promedio de los vecinos  $\langle k_{neig}^d \rangle$  y el grado de agrupamiento  $\langle C^d \rangle$  son mucho más grandes en las redes duales, al igual que la cercanía entre los nodos  $\langle C_{cen}^d \rangle$ , lo que podría deberse a los nodos concentradores presentes en estas redes duales, reforzando así la idea de que las redes duales son libre de escala.

*Tabla 1. Muestra de datos topológicos de red primaria.* Se exponen los datos más relevantes de seis colonias bajo el enfoque primario. El valor de  $\langle k \rangle$  expresado corresponde al que tendrían las redes viales si fueran no dirigidas y el valor de  $\langle k^{in} \rangle$  será la mitad del mismo e igual al de  $\langle k^{out} \rangle$ .

Colonia	N	L	$\langle k \rangle$	$\langle k_{neig} \rangle$	$\langle C \rangle$	$\langle B \rangle$	$\langle C_{cen} \rangle$
Agrícola Oriental	784	2157	5.50	2.95	0.0142	0.0287	5.99E-04
Ciudad Jardín	110	234	4.25	2.47	0.0470	0.0759	1.43E-03
Hipódromo	165	406	4.92	1.77	0.0500	0.0381	9.49E-04
Letrán Valle	92	197	4.28	1.95	0.0562	0.0865	1.22E-03
Navarrete	290	722	4.98	2.06	0.0465	0.0336	7.81E-04
Romero Terrero	190	386	4.06	2.21	0.0347	0.0517	1.17E-03

*Tabla 2. Muestra de datos de Red Dual.* Se exponen los datos más relevantes de seis colonias bajo el enfoque dual.

Colonia	$N_d$	$L_d$	$\langle k_d \rangle$	$\langle k_{neig}^d \rangle$	$\langle C_d \rangle$	$\langle B_d \rangle$	$\langle C_{cen}^d \rangle$
Agrícola Oriental	347	776	4.47	19.5	0.137	7.33E-03	0.267
Ciudad Jardín	46	93	4.04	9.02	0.387	0.0365	0.386
Hipódromo	98	265	5.41	14.3	0.387	0.0182	0.367
Letrán Valle	35	107	6.11	13.8	0.300	0.0296	0.508
Navarrete	75	354	9.44	16.9	0.279	0.0176	0.443
Romero Terrero	82	141	3.44	8.02	0.188	0.0304	0.294

Finalmente, se generaron las matrices de correlación y se encontró que no hay evidencia significativa de la existencia de correlaciones entre las variables topológicas de las redes, primarias y duales, con los datos disponibles de ira al

volante (Hernández-Hernández et al., 2019). El valor con mayor índice de Pearson, en las redes primarias, fue el promedio de la cercanía entre los nodos, con un coeficiente de  $\Gamma_{DAS-\langle C_{cen} \rangle} = -0.316$ , se observa que este valor está muy por debajo del valor aceptado ( $|\Gamma| \geq 0.7$ ) para considerar una correlación lineal entre los índices de ira de las colonias y el promedio de la cercanía de los nodos. De manera similar, en las redes duales se encontró nula evidencia de correlaciones entre los valores topológicos y los índices de ira al volante de las colonias siendo el mayor índice, una vez más, el de  $\Gamma_{DAS-\langle C_{cen} \rangle} = -0.370$ , lo que resulta interesante dada la diferencia de los enfoques bajo los que se realizó el estudio (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Matrices de correlación para redes primarias. Dentro de estas matrices simétricas se encuentran los respectivos coeficientes de correlación entre cada variable. En gris oscuro se señala el coeficiente más alto respecto al DAS y en gris claro se somborean los valores de  $\Gamma > 0.7$ .

	DAS	N	L	$\langle k \rangle$	$N_{den}$	$\langle k_{neig} \rangle$	$\langle C \rangle$	$\langle B \rangle$	$d_{max}$	$\langle C_{cen} \rangle$
DAS	1									
N	0.234	1								
L	0.241	0.979	1							
$\langle k \rangle$	0.221	0.284	0.410	1						
$N_{den}$	-0.233	-0.256	-0.209	0.034	1					
$\langle k_{neig} \rangle$	0.174	0.272	0.377	0.863	0.1640	1				
$\langle C \rangle$	0.0571	-0.222	-0.238	0.079	-0.246	-0.052	1			
$\langle B \rangle$	-0.281	-0.717	-0.688	-0.292	0.308	-0.167	-0.023	1		
$d_{max}$	0.227	0.842	0.792	0.143	-0.523	0.129	-0.221	-0.612	1	
$\langle C_{cen} \rangle$	-0.316	-0.578	-0.525	0.127	0.702	0.233	0.053	0.622	-0.738	1

Tabla 4. Matrices de correlación para redes duales. Dentro de estas matrices simétricas se encuentran los respectivos coeficientes de correlación entre cada variable. En gris oscuro se señala el coeficiente más alto respecto al DAS y en gris claro se somborean los valores de  $\Gamma > 0.7$ .

	DAS	N	L	$\langle k \rangle$	$N_{den}$	$\langle k_{neig} \rangle$	$\langle C \rangle$	$\langle B \rangle$	$d_{max}$	$\langle C_{cen} \rangle$
DAS	1									
N	0.290	1								
L	0.250	0.911	1							
$\langle k \rangle$	-0.035	-0.045	0.305	1						
$N_{den}$	-0.370	-0.726	-0.598	0.260	1					
$\langle k_{neig} \rangle$	0.166	0.651	0.741	0.425	-0.336	1				
$\langle C \rangle$	0.174	-0.177	-0.136	0.174	-0.051	-0.190	1			
$\langle B \rangle$	-0.194	-0.470	-0.336	-0.087	0.469	-0.461	-0.087	1		
$d_{max}$	0.307	0.538	0.325	-0.433	-0.693	0.002	0.014	-0.306	1	
$\langle C_{cen} \rangle$	-0.372	-0.590	-0.383	0.484	0.867	0.045	-0.068	0.288	-0.814	1

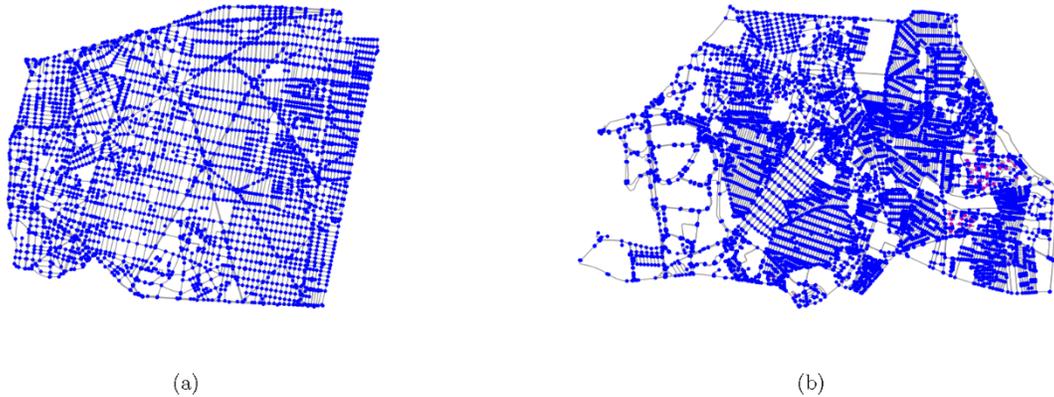
Por otro lado, de las matrices de correlaciones para las redes primarias (*Tabla 3*) se observan marcadas correlaciones entre el número de nodos  $N$ , el número de enlaces  $L$  y el diámetro de la red  $d_{max}$ ; esto es un resultado esperado ya que mientras más nodos haya, más enlaces puede haber y por lo tanto el tamaño de la es más grande. También, el grado promedio  $\langle k \rangle$  y el grado promedio de los vecinos de los nodos  $\langle k_{neig} \rangle$  se encuentran íntimamente correlacionados lo que indica que los nodos están bastante bien interconectados entre ellos. En contraste, la cercanía promedio de los nodos  $\langle C_{cen} \rangle$  está inversamente correlacionada con el diámetro de la red  $d_{max}$ ; lo cual también es un resultado esperado ya que mientras más lejos estén los nodos entre ellos, los valores de la cercanía disminuirán. Las anteriores, en conjunto, son correlaciones esperadas debido a las respectivas definiciones de las variables involucradas y esto lleva a pensar que las redes obtenidas están bien definidas.

Por otra parte, el hecho de que gran parte de las correlaciones anteriores estén ausentes en las redes duales no es de extrañar, ya que éstas presentan distribuciones similares a una libre de escala y la presencia de los nodos concentradores afecta los valores obtenidos. Sin embargo, sí están presentes las correlaciones entre  $N_d$  y  $L_d$ , la relación inversa entre  $\langle C_{cen}^d \rangle$  y  $d_{max}$  y la relación casi lineal entre la  $\langle C_{cen}^d \rangle$  y  $N_{den}$ . Relaciones esperadas entre estas variables. Finalmente, el hecho de que el grado promedio de los vecinos  $\langle k_{neig}^d \rangle$ , el grado de agrupamiento  $\langle C^d \rangle$  y la cercanía entre los nodos  $\langle C_{cen}^d \rangle$  sean mucho más grandes en las redes duales son señales de que la presencia de los nodos concentradores en las redes duales acerca a todos los nodos y modifica la topología de las redes viales.

### 4.3. Alcaldías

El tamaño de las alcaldías es mucho más grande comparado con el de las colonias y por lo tanto su caracterización es mucho más costosa en términos computacionales (*Figura 10*). Es por esta razón que el análisis dual se dejó de lado para fines de este trabajo. Sin embargo, el análisis primario arrojó datos interesantes al respecto de la topología de estas redes. Lo más destacable fue que, de manera similar al caso de las colonias, hay algunas redes de las alcaldías cuyas distribuciones de grado son similares a una distribución de Poisson, los casos más

relevantes son: Azcapotzalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco y Miguel Hidalgo, cuyas distribuciones de grado se muestran en la *Figura 11*.



*Figura 10. Alcaldías (a) Benito Juárez y (b) Coyoacán. Se muestran las redes de las alcaldías obtenidas mediante el enfoque primario. En la alcaldía Coyoacán se observan en color magenta los bucles que la red posee, estos se ubican, por ejemplo, en entradas a condominios o privadas donde se tiene una sola calle que circunda las casas habitación y que solamente posee un acceso que funge como entrada y salida.*

Las redes de las alcaldías también se caracterizaron mediante OSMnx y los datos obtenidos se muestran en la **Apéndice D**. La *Tabla 5* muestra los datos topológicos obtenidos mediante OSMnx para las 6 alcaldías mencionadas anteriormente. A pesar de que las distribuciones de grado de dichas alcaldías son similares a una red aleatoria, por definición, estas redes estarían en el régimen conexo ya que para todas ellas  $\langle k \rangle > \ln N$ . De ser así, todos los nodos estarían conectados entre ellos y formarían parte del componente gigante, sin embargo, hace falta un análisis más detallado que está fuera de los límites de esta tesis para ver si esto en verdad ocurre.

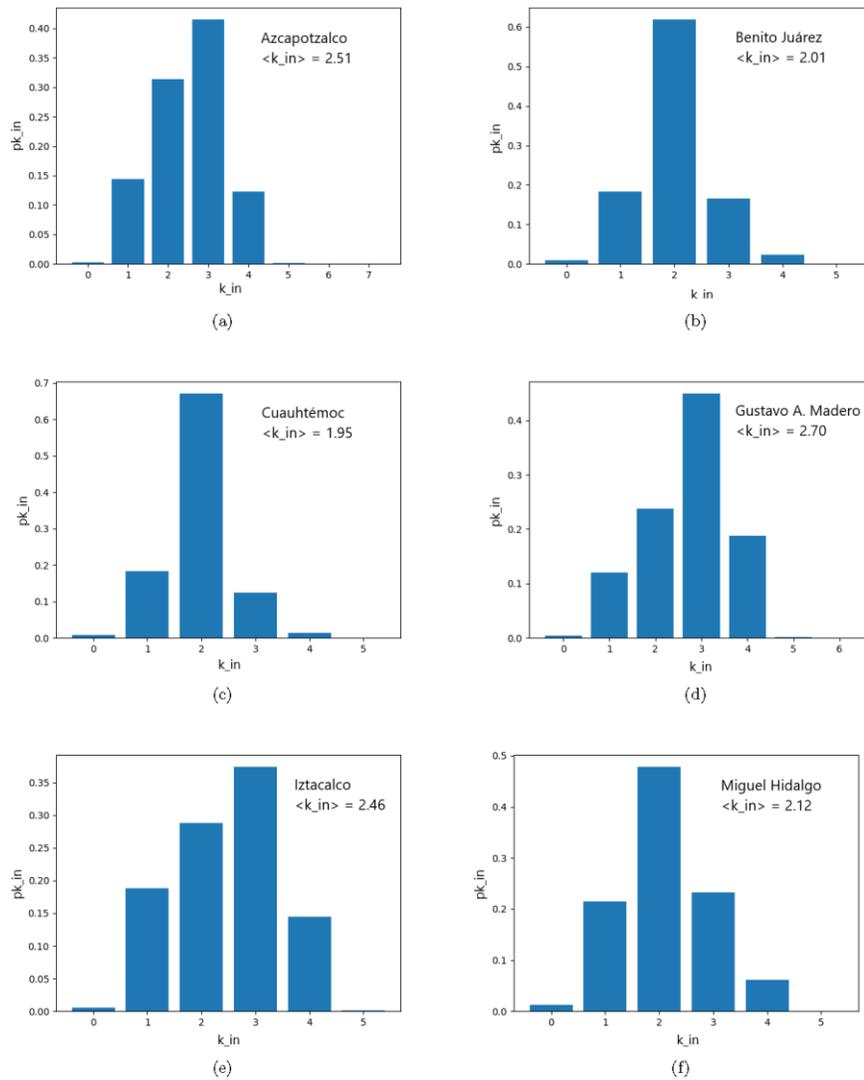


Figura 11. Distribuciones de grado para las redes primarias de 6 alcaldías de la Ciudad de México. Se observa que estas distribuciones son similares a una distribución de Poisson con sus picos variando entre los valores  $k_{in} = 2$  y  $k_{in} = 3$ .

Tabla 5. Datos topológicos para red primaria para seis alcaldías de la Ciudad de México. Se exponen los datos topológicos más relevantes de las alcaldías cuyas distribuciones de grado asemejan más a una distribución de Poisson. El valor de  $\langle k \rangle$  expresado corresponde al que tendrían las redes viales si fueran no dirigidas y el valor de  $\langle k^{in} \rangle$  será la mitad del mismo e igual al de  $\langle k^{out} \rangle$ .

	$N$	$L$	$\langle k \rangle$	$\langle k_{neig} \rangle$	$\langle C \rangle$	$\langle B \rangle$
Azcapotzalco	4175	10495	5.03	2.73	0.0284	0.0115
Benito Juárez	3759	7562	4.02	2.08	0.0380	0.0111
Cuauhtémoc	4135	8073	3.90	2.00	0.0289	0.0100
Gustavo A. Madero	12948	34974	5.40	2.86	0.0289	0.00759
Iztacalco	4419	10896	4.93	2.68	0.0162	0.0121
Miguel Hidalgo	5099	10799	4.24	2.21	0.0392	0.00943

## 5. Conclusiones

La correlación más grande obtenida entre los datos topológicos y los índices de ira al volante (DAS) en la Ciudad de México fue la obtenida entre el promedio de la cercanía de la red  $\langle c_{cen} \rangle$  y los índices de ira (DAS). Dicho coeficiente no es lo suficientemente grande como para considerarlo un factor decisivo en la predicción de la ira que aqueja a los conductores. No obstante, es importante considerar que este padecimiento es muy complejo e involucra muchos factores de diversa índole donde ahora se puede descartar, al menos de manera local, el impacto que la red vial tiene sobre los conductores. Lo anterior no implica que la red no tenga impacto en el flujo del tráfico y que como resultado de su topología ocurran embotellamientos, accidentes u otros eventos que ayuden a desencadenar los padecimientos de ira de los automovilistas. También, el hecho de que el número de colonias para las cuales se tienen datos disponibles siga siendo una muestra pequeña que no representa la totalidad de la ciudad, podría tener una influencia en los resultados de este estudio y, por lo tanto, no se descarta que la cercanía de los nodos tenga un impacto importante en alguna muestra de mayor tamaño. Así mismo, este estudio está realizado sobre las colonias de una sola ciudad donde el estilo de vida difiere de otras del país, lo que podría ser un factor importante en los resultados obtenidos.

Con respecto a las redes viales de las alcaldías y a los datos extraídos de ellas, se observa en la *Tabla 5* que el grado promedio de los nodos  $\langle k \rangle$  y la media del grado promedio de los vecinos  $\langle k_{neig} \rangle$  son bastante similares a los obtenidos en las redes primarias para las colonias a pesar de que  $N$  y  $L$  son diferentes en orden de magnitud. Esta es una característica intrínseca de las redes aleatorias que pueden ser descritas mediante una distribución de Poisson (recordando que la distribución no depende de  $N$ ) y podría indicar la aleatoriedad de dichas redes. Por otro lado, el hecho de que tanto el promedio del coeficiente de agrupamiento  $\langle C \rangle$  como la intermediación de estas redes  $\langle B \rangle$  sea muy pequeño, brinda información acerca de lo poco conexas que son las redes viales, tanto de las alcaldías como de las colonias, y que podría tener un impacto en la facilidad de encontrar rutas alternas para llegar desde un punto hasta otro de la ciudad.

En cuanto a la metodología utilizada, el uso combinado de los archivos .shp, el programa QGIS y la librería OSMnx permite la obtención de las redes viales de manera sencilla y reproducible, siendo el último rubro el más importante. Por otro lado, el hecho de obtener grafos con un solo nodo en las glorietas es un avance para la obtención de las redes, ya que OSMnx, aún después de limpiar los nodos redundantes mostrados en rojo en la *Figura 4*, carece de una característica que permita mostrar toda la convergencia de las calles en un solo punto cuando se tiene una glorieta.

## 6. Perspectivas

- Extender el estudio de la red primaria para todas las redes viales de la Ciudad de México así como para colonias dentro de otras localidades, para observar si la correlación entre la cercanía de los nodos y los niveles de DAS se mantiene, crece o decrece.
- Dado que las redes obtenidas no tienen en cuenta factores como la altura al nivel del mar de las colonias, las pendientes de las calles, los índices de criminalidad, alumbrado público o el estado físico de las calles, estos factores podrían tener un impacto en los niveles de ira al manejar. Entonces, para hacer aún más detallado este estudio sería necesario incluir este tipo de factores que podrían estar relacionados con los niveles de ira presentados por los conductores que viven en estas colonias.
- Utilizar las mediciones disponibles del Inventario de Expresión de Ira (DAX), el Índice de Conducción Peligrosa de Dula (DDDI) (cuyo objetivo principal es conocer la forma en la que se expresa la ira al conducir) en conjunto con los datos de DAS (que mide el nivel de ira al conducir) para estudiar por medio de modelación basada en agentes los efectos de los comportamientos registrados por los encuestados en la movilidad dentro de las redes viales.

## Referencias bibliográficas

- Achibet, M., Balev, S., Dutot, A., & Olivier, D. (2014). A model of road network and buildings extension co-evolution. *Procedia Computer Science*, 32, 828–833. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.498>
- Albert-László Barabási. (2015). *Network Science*. Cambridge, University Press.
- Barredo, J. I., Demicheli, L., Lavallo, C., Kasanko, M., & McCormick, N. (2004). Modelling future urban scenarios in developing countries: An application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 65–84. <https://doi.org/10.1068/b29103>
- Batty, M. (2004). *A New Theory of Space Syntax* (Vol. 75). London. Recuperado de <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/211/>
- Batty, M. (2018). Visualizing aggregate movement in cities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1753). <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0236>
- Boeing, G. (2017). OSMnx : New methods for acquiring , constructing , analyzing , and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>
- Boeing, G. (2018). Measuring the complexity of urban form and design. *Urban Design International*, 23(4), 281–292. <https://doi.org/10.1057/s41289-018-0072-1>
- Boldi, P., & Vigna, S. (2012). Four degrees of separation. *Proceedings of the 2012 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining, ASONAM 2012*, 1222–1227. <https://doi.org/10.1109/ASONAM.2012.211>
- Burt, V., Chraif, M., Anit, M., & Mih, T. (2016). The incremental validity of the dark triad in predicting driving aggression. *Accident Analysis and Prevention*, 96, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.027>
- Bushman, B. J., Steffgen, G., Kerwin, T., Whitlock, T., & Weisenberger, J. M.

- (2018). "Don't you know I own the road?" The link between narcissism and aggressive driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 52, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.10.008>
- Courtat, T., Gloaguen, C., & Douady, S. (2011). Mathematics and morphogenesis of cities: A geometrical approach. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.036106>
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality in networks of urban streets. *Chaos*, 16(1). <https://doi.org/10.1063/1.2150162>
- Deffenbacher, J. L., Oetting, E. R., & Lynch, R. S. (1994). Development of a driving anger scale. *Psychological reports*, 74(1), 83–91. <https://doi.org/10.2466/pr0.1994.74.1.83>
- Deffenbacher, Jerry L., Lynch, R. S., Oetting, E. R., & Swaim, R. C. (2002). The Driving Anger Expression Inventory: A measure of how people express their anger on the road. *Behaviour Research and Therapy*. [https://doi.org/10.1016/S0005-7967\(01\)00063-8](https://doi.org/10.1016/S0005-7967(01)00063-8)
- DePasquale, J. P., Geller, E. S., Clarke, S. W., & Littleton, L. C. (2001). Measuring road rage: Development of the Propensity for Angry Driving Scale. *Journal of Safety Research*, 32(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(00\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(00)00050-5)
- Desmond, P. A., & Matthews, G. (2009). Individual differences in stress and fatigue in two field studies of driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 12(4), 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2008.12.006>
- Dorantes Argandar, G., Cerda Macedo, E., Tortosa Gil, F., & Ferrero Berlanga, J. (2015). Accidentalidad de automóviles de uso particular en México: influencia del estrés y la agresividad. *PSIENCIA: Revista Latinoamericana de Ciencia Psicológica*.
- Dula, C. S., & Ballard, M. E. (2003). Development and evaluation of a measure of dangerous, aggressive, negative emotional, and risky driving. *Journal of Applied Social Psychology*. <https://doi.org/10.1111/j.1559->

- Feng, Z., Yang, M., Ma, C., Jiang, K., Lei, Y., Huang, W., ... Zhou, M. (2017). Driving anger and its relationships with type A behavior patterns and trait anger: Differences between professional and non-professional drivers. *PLoS ONE*, 12(12), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189793>
- Galovski, T. E., & Blanchard, E. B. (2004). Road rage: A domain for psychological intervention? *Aggression and Violent Behavior*, 9(2), 105–127. [https://doi.org/10.1016/S1359-1789\(02\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S1359-1789(02)00118-0)
- Ge, Y., Qu, W., Jiang, C., Du, F., Sun, X., & Zhang, K. (2014). The effect of stress and personality on dangerous driving behavior among Chinese drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 73, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.07.024>
- Hernández-Hernández, A., Robles-Belmont, E., & Gershenson, C. (2019). Anger while driving in Mexico City. *PLoS ONE*, 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223048>
- Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*. Cambridge, University Press.
- Jiang, B., & Claramunt, C. (2002). Integration of space syntax into GIS: New perspectives for urban morphology. *Transactions in GIS*, 6(3), 295–309. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00112>
- Jiang, B., & Claramunt, C. (2004). Topological analysis of urban street networks. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 151–162. <https://doi.org/10.1068/b306>
- Jones, P. (2014). The evolution of urban mobility: The interplay of academic and policy perspectives. *IATSS Research*, 38(1), 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2014.06.001>
- Knight, P. L., & Marshall, W. E. (2015). The metrics of street network connectivity: their inconsistencies. *Journal of Urbanism*.

<https://doi.org/10.1080/17549175.2014.909515>

- Lajunen, T., Parker, D., & Stradling, S. G. (1998). Dimensions of driver anger, aggressive and highway code violations and their mediation by safety orientation in UK drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 1(2), 107–121. [https://doi.org/10.1016/S1369-8478\(98\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S1369-8478(98)00009-6)
- Li, F., Yao, X., Jiang, L., & Li, Y. J. (2014). Driving anger in China: Psychometric properties of the Driving Anger Scale (DAS) and its relationship with aggressive driving. *Personality and Individual Differences*, 68, 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2014.04.018>
- McLinton, S. S., & Dollard, M. F. (2010). Work stress and driving anger in Japan. *Accident Analysis and Prevention*, 42(1), 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.07.016>
- Monteiro, R. P., Coelho, G. L. de H., Hanel, P. H. P., Pimentel, C. E., & Gouveia, V. V. (2018). Personality, dangerous driving, and involvement in accidents: Testing a contextual mediated model. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 58, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.06.009>
- Parker, D., Lajunen, T., & Summala, H. (2002). Anger and aggression among drivers in three European countries. *Accident Analysis and Prevention*, 34(2), 229–235. [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(01\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00018-5)
- Porta, S., Crucitti, P., & Latora, V. (2006). The network analysis of urban streets: A dual approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 369(2), 853–866. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.12.063>
- Smart, R. G., Stoduto, G., Mann, R. E., Edward, M., Smart, R. G., & Stoduto, G. (2010). Road Rage Experience and Behavior : Vehicle, Exposure and Driver Factors. *Traffic Injury Prevention*, 9588, 343–348. <https://doi.org/10.1080/15389580490509482>
- Sullman, M. J. M. (2006). Anger amongst New Zealand drivers. *Transportation*

*Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 9(3), 173–184.

<https://doi.org/10.1016/j.trf.2005.10.003>

Yinon, Y., & Levian, E. (1995). Presence of other drivers as a determinant of traffic violations. *Journal of Social Psychology*, 135(3), 299–304.

<https://doi.org/10.1080/00224545.1995.9713959>

## Apéndices

### Apéndice A: Lista y abreviaciones de las 42 Colonias analizadas de la Ciudad de México

Letrán Valle (LV)
Josefa Ortiz de Domínguez (JOdD)
Copilco Universidad (CU)
Tecorral (TEC)
Reforma Política (RP)
Portales (POR)
Santa María del Monte (SMdM)
San Pedro de los Pinos (SPdIP)
Santa María Acatitla (SMA)
Avante (AV)
Santa María de la Ribera (SMR)
Pedregal Santo Domingo (PSD)
Escandón (E2)
Cantera Puente de Piedra (CPP)
Santa Úrsula Coapa (SUC)
Benito Juárez (BJ)
Santa María Tepepan (SMT)
Mixcoac (M)
Del valle (DV)
San Andrés Tetepilco (SAT)
Constitución de 1917 (C1917)
Copilco el Bajo (CEB)
La Concepción (LC)
La Laguna Tecomán (LLT)
San Miguel Ajusco (SMAP)
Santa Úrsula Xilitla (SUX)
Hipódromo (H)
Prado Churubusco (PC)
Romero Terrero (RT)
Miguel Hidalgo (MH)
Sector Popular (SP)
Agrícola Oriental (AO)
Insurgentes Cuicuilco (IC)
Navarrete (N)
Prado Coapa (PCO)
Ciudad Jardín (CJ)
Lomas Estrella (LE)
Héroes de Padierna (HP)
Palmita (P)
San Jerónimo Lídice (SJL)
Lomas Quebradas (LQ)
San José Insurgentes (SJI)

## Apéndice B: Datos de las colonias como red primaria

Colonia	DAS	N	L	$\langle k \rangle$	$S_{igt}$ (m)	$\langle k_{neig} \rangle$	$\langle C \rangle$	$\langle B \rangle$	$d_{max}$	$\langle C_{cen} \rangle$
LV	1.83	92	197	4.283	111.606	1.948	0.056	0.087	2474.157	1.22E-03
JOdD	2.03	34	54	3.176	59.071	1.500	0.000	0.080	761.768	2.51E-03
CU	2.18	120	189	3.150	78.043	1.621	0.018	0.075	3601.439	8.80E-04
TEC	2.18	33	68	4.121	52.150	2.768	0.000	0.132	578.337	4.22E-03
RT	2.43	280	744	5.314	67.064	3.041	0.036	0.044	1814.514	1.51E-03
POR	2.44	325	601	3.698	99.117	1.840	0.053	0.034	3077.253	8.04E-04
SMdM	2.52	32	80	5.000	97.047	2.917	0.063	0.123	1333.481	3.19E-03
SPdIP	2.6	32	54	3.688	117.877	1.708	0.047	0.068	797.394	1.50E-03
SMA	2.61	404	1041	5.153	100.547	2.908	0.032	0.044	4978.868	5.86E-04
AV	2.63	279	570	4.086	94.936	2.363	0.012	0.044	3383.789	8.07E-04
SMR	2.65	241	440	3.602	94.521	1.840	0.009	0.051	3121.625	7.81E-04
PSD	2.67	551	1464	5.314	87.669	2.968	0.008	0.031	3482.757	8.03E-04
E	2.69	187	323	3.455	99.313	1.766	0.039	0.054	2718.395	8.30E-04
CPP	2.73	54	131	4.852	84.621	2.895	0.051	0.077	1046.880	2.23E-03
SUC	2.73	119	275	4.622	87.675	2.670	0.056	0.076	2427.241	1.32E-03
BJ	2.78	71	196	5.521	57.927	3.028	0.035	0.086	1028.049	3.06E-03
SMT	2.78	287	608	4.237	89.469	2.525	0.017	0.048	3627.775	7.89E-04
M	2.91	60	97	3.133	98.120	1.548	0.014	0.119	1975.336	1.13E-03
DV	2.92	668	1226	3.671	103.689	1.888	0.042	0.027	5497.560	4.99E-04
SAT	2.92	226	528	4.673	86.223	2.702	0.013	0.051	3211.702	1.13E-03
C1917	2.95	354	926	5.232	67.745	2.882	0.005	0.053	4225.004	9.44E-04
CEB	2.97	51	89	3.490	62.089	1.807	0.039	0.085	845.383	1.87E-03
LC	2.98	61	124	4.066	78.389	2.351	0.016	0.084	1226.279	1.55E-03
LLT	2.98	85	248	5.835	98.377	3.134	0.019	0.069	3296.847	1.69E-03
SMAP	2.83	500	1124	4.472	104.407	2.816	0.013	0.036	6003.424	7.09E-04
SUX	3.04	107	233	4.355	121.670	2.457	0.000	0.069	2517.824	1.02E-03
H	3.05	165	406	4.921	86.101	1.770	0.050	0.038	2590.259	9.49E-04
PC	3.07	150	279	3.720	126.443	2.319	0.030	0.054	3321.092	7.03E-04
RT	3.08	190	386	4.063	80.700	2.214	0.035	0.052	1987.662	1.17E-03
MH	3.1	588	1516	5.156	80.928	3.024	0.029	0.037	3972.575	7.12E-04
SP	3.12	91	232	5.099	81.193	2.678	0.037	0.076	1476.873	2.05E-03
AO	3.16	784	2157	5.503	92.657	2.964	0.014	0.029	5486.622	5.99E-04
IC	3.17	76	134	3.263	90.604	1.610	0.013	0.149	2954.281	7.13E-04
N	3.19	290	722	4.979	114.376	2.060	0.046	0.034	3425.578	7.81E-04
PCO	3.22	143	308	4.308	88.363	2.262	0.064	0.070	2634.631	1.34E-03
CJ	3.28	110	234	4.255	86.549	2.470	0.047	0.076	1808.559	1.43E-03
LE	3.33	268	618	4.612	89.557	2.576	0.029	0.049	3205.728	9.41E-04
HP	3.48	82	184	4.488	88.272	2.444	0.046	0.054	1898.393	1.31E-03
P	3.48	188	476	5.064	58.059	2.936	0.024	0.054	1425.843	1.77E-03
SJL	3.51	620	1351	4.358	105.877	2.449	0.014	0.030	5518.103	5.55E-04
LQ	2.28	82	192	4.683	87.609	2.671	0.043	0.092	1748.725	1.44E-03
SJI	3.15	148	305	4.122	93.099	2.167	0.081	0.053	2731.622	1.17E-03

## Apéndice C: Datos de las colonias como red dual

Colonia	DAS	N	L	$\langle k \rangle$	$\langle k_{neig} \rangle$	$\langle C \rangle$	$\langle B \rangle$	$d_{max}$	$\langle C_{cen} \rangle$
LV	1.83	35.000	107.000	6.114	13.792	0.300	0.030	4.000	0.508
JOdD	2.03	15.000	26.000	3.467	5.244	0.000	0.084	5.000	0.471
CU	2.18	54.000	85.000	3.148	8.369	0.276	0.040	6.000	0.323
TEC	2.18	17.000	19.000	2.235	4.684	0.026	0.101	5.000	0.389
RT	2.43	155.000	295.000	3.806	7.544	0.328	0.021	9.000	0.240
POR	2.44	63.000	303.000	9.619	15.251	0.195	0.021	5.000	0.449
SMdM	2.52	20.000	30.000	3.000	3.957	0.178	0.098	6.000	0.377
SPdIP	2.6	19.000	35.000	3.684	4.507	0.348	0.090	6.000	0.397
SMA	2.61	176.000	354.000	4.023	10.292	0.181	0.018	10.000	0.249
AV	2.63	126.000	183.000	2.905	18.510	0.145	0.018	6.000	0.313
SMR	2.65	101.000	241.000	4.772	13.525	0.103	0.020	6.000	0.340
PSD	2.67	237.000	482.000	4.068	16.824	0.127	0.011	8.000	0.283
E	2.69	82.000	194.000	4.732	7.962	0.169	0.026	6.000	0.325
CPP	2.73	27.000	56.000	4.148	6.194	0.237	0.061	5.000	0.412
SUC	2.73	74.000	115.000	3.108	6.625	0.205	0.037	8.000	0.275
BJ	2.78	34.000	69.000	4.059	5.721	0.273	0.052	5.000	0.375
SMT	2.78	155.000	229.000	2.955	9.606	0.202	0.020	9.000	0.230
M	2.91	25.000	47.000	3.760	4.749	0.093	0.062	5.000	0.395
DV	2.92	195.000	637.000	6.533	15.847	0.165	0.165	6.000	0.329
SAT	2.92	144.000	246.000	3.417	8.311	0.168	0.020	8.000	0.266
C1917	2.95	153.000	352.000	4.601	11.958	0.153	0.019	8.000	0.266
CEB	2.97	25.000	41.000	3.280	5.159	0.298	0.071	5.000	0.376
LC	2.98	38.000	55.000	2.895	3.881	0.205	0.075	8.000	0.272
LLT	2.98	36.000	88.000	4.889	7.723	0.182	0.043	5.000	0.406
SMAP	2.83	284.000	384.000	2.704	10.883	0.203	0.012	11.000	0.211
SUX	3.04	81.000	117.000	2.889	5.115	0.186	0.051	14.000	0.203
H	3.05	98.000	265.000	5.408	14.334	0.387	0.018	7.000	0.367
PC	3.07	60.000	97.000	3.233	9.372	0.354	0.038	7.000	0.306
RT	3.08	82.000	141.000	3.439	8.019	0.188	0.030	7.000	0.294
MH	3.1	276.000	510.000	3.696	12.063	0.153	0.013	10.000	0.206
SP	3.12	25.000	57.000	4.560	16.186	0.000	0.039	4.000	0.538
AO	3.16	347.000	776.000	4.473	19.515	0.137	0.007	8.000	0.267
IC	3.17	41.000	51.000	2.488	6.223	0.102	0.066	7.000	0.243
N	3.19	75.000	354.000	9.440	16.942	0.279	0.018	4.000	0.443
PCO	3.22	76.000	129.000	3.395	8.214	0.316	0.040	12.000	0.264
CJ	3.28	46.000	93.000	4.043	9.022	0.387	0.037	5.000	0.386
LE	3.33	193.000	290.000	3.005	12.556	0.149	0.015	9.000	0.220
HP	3.48	35.000	70.000	4.000	4.919	0.294	0.060	8.000	0.324
P	3.48	122.000	211.000	3.459	5.784	0.271	0.029	10.000	0.228
SJL	3.51	324.000	535.000	3.302	23.450	0.133	0.009	10.000	0.256
LQ	2.28	55.000	88.000	3.200	5.510	0.190	0.053	9.000	0.268
SJI	3.15	52.000	137.000	5.269	5.656	0.356	0.053	4.000	0.272

## Apéndice D: Datos de las alcaldías como red primaria

Alcaldías	N	L	$\langle k \rangle$	$\langle k_{neig} \rangle$	$\langle C \rangle$	$\langle B \rangle$
Álvaro Obregón	9351.00	22566.00	4.83	0.0342	0.03	0.00889
Azcapotzalco	4175.00	10495.00	5.03	0.0284	0.03	0.01149
Benito Juárez	3759.00	7562.00	4.02	0.0380	0.04	0.01107
Coyoacán	7271.00	17061.00	4.69	0.0248	0.02	0.00794
Cuajimalpa	3258.00	7114.00	4.37	0.0261	0.03	0.01544
Cuauhtémoc	4135.00	8073.00	3.90	0.0289	0.03	0.01000
Gustavo A. Madero	12948.00	34974.00	5.40	0.0289	0.03	0.00759
Iztacalco	4419.00	10896.00	4.93	0.0162	0.02	0.01210
Iztapalapa	22936.00	60452.00	5.27	0.0457	0.05	0.00348
Magdalena Contreras	3698.00	8908.00	4.82	0.0212	0.02	0.01241
Miguel Hidalgo	5099.00	10799.00	4.24	0.0392	0.04	0.00943
Milpa Alta	3365.00	8286.00	4.92	0.0206	0.02	0.01888
Tláhuac	5870.00	15699.00	5.35	0.0161	0.02	0.01234
Tlalpan	10976.00	27281.00	4.97	0.0382	0.04	0.00525
Venustiano Carranza	4780.00	12140.00	5.08	0.0350	0.04	0.01019
Xochimilco	9717.00	22565.00	4.64	0.0150	0.01	0.00817