



CIATEC

Caracterización y evaluación de la infraestructura de transporte de México: Un enfoque logístico desde la Teoría de Gráficas.

Tesis

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE:

Maestro en Ciencia y
Tecnología
en la Especialidad de
Ingeniería Industrial y de
Manufactura.

PRESENTA

Jared Piña Barcenas

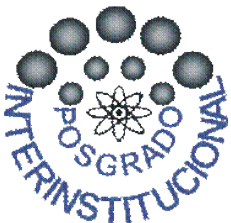
Director:

Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos.

Co director:

Dr. Eric Moreno Quintero.

León, Guanajuato, México, Diciembre del 2017.



León, Gto., a 06 diciembre de 2017.

Ref. No. 09317/Posgrados/PICYT.

Coordinación de Posgrado.
PICYT – CIATEC.
Guanajuato.

Los abajo firmantes miembros del Comité Tutorial del alumno Jared Piña Barcenás, una vez leída y revisada la Tesis titulada “*Caracterización y evaluación de la infraestructura de transporte de México: Un enfoque logístico desde la Teoría de Gráficas*”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Maestro en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 06 días del mes de diciembre del año dos mil diecisiete.

Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos
Tutor Académico.

Dr. Eric Moreno Quintero
Tutor en Planta.

EG-850-01-F13

Agradecimientos

Sin un orden de importancia, quiero agradecer a las personas que considero fueron clave para esta etapa de mi formación, los cuales son: el Dr. Eric Moreno, la Dra. Elizabeth de la Torre y el Dr. Gastón Cedillo. Otro agradecimiento es para las instituciones que de alguna forma participaron en el desarrollo de este proyecto, como son el CIATEC, el Instituto Mexicano del Transporte y al CONACYT por su apoyo económico para llevar a cabo mis estudios.

Finalmente, a mis compañeros de la maestría Pamela Hernández y Carlos Mario Pérez por tantas vivencias compartidas.

Resumen autobiográfico del autor

Jared Piña Barcenás, nació en la ciudad de Querétaro el día 2 de Mayo de 1987. Se graduó como Licenciado en Matemáticas Aplicadas por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Durante sus estudios universitarios fue auxiliar de investigación en la Facultad de Ingeniería de la UAQ dando como resultado su participación con publicaciones en congresos internacionales. En lo laboral, en un inicio se desarrolló en el ámbito de las tecnologías de la información, realizando proyectos de banca digital. Más tarde, durante cuatro años consecutivos ha apoyado en proyectos del Instituto Mexicano del Transporte (IMT), realizando análisis estadísticos y desarrollos informáticos. Actualmente se desempeña como Investigador Asistente en el área de Integración del Transporte del IMT. Entre otras actividades, ha participado en el Comité de Revisión Técnica de las contribuciones científicas del CiLOG 2017.

Resumen

La distribución física de las mercancías se encuentra entre las actividades de la logística que aporta un importante valor agregado a las organizaciones. Actualmente, México cuenta con 12 Tratados de Libre Comercio con 46 países. Además se establece dentro del Plan Nacional de Infraestructura la importancia de transformar a México en una Plataforma Logística para el Comercio Global, siendo la inversión en infraestructura un tema estratégico y prioritario para México. Estudios mencionan que la eficiencia y capacidad de la infraestructura de transporte tiene un impacto directo sobre la mejora de los servicios de transporte, que a su vez impacta en los costos de la logística. Fue de interés del presente trabajo determinar la influencia que tienen las características de la infraestructura de transporte, sobre la robustez de la red carretera. Así se planteó el objetivo de caracterizar la infraestructura de transporte desde una perspectiva logística, mediante la teoría de gráficas con el fin de establecer el nivel de robustez de la red carretera nacional.

Mediante la revisión exhaustiva del estado del arte, se detectaron los índices topológicos a tomar en cuenta para la caracterización de la red. También se encontró que actualmente para el análisis de las redes de transporte desde la teoría de gráficas, se propone la representación dual de la gráfica, en la que las carreteras pasan a ser representadas por nodos de la gráfica, con la ventaja de enfocar la evaluación de los índices en los tramos carreteros. Dicha representación fue utilizada para el análisis de la red carretera pavimentada definida por la Dirección General de Servicios Técnicos en conjunto con el modelo de la Red Nacional de Caminos de México. Al final, se realizaron pruebas de correlación entre los índices topológicos y la variación media de la distancia y el tiempo, al simular posibles bloqueos en los tramos carreteros. Dentro de las aportaciones que se alcanzaron con la investigación se encuentran: i) la determinación de correlación entre el índice de centralidad por intermediación y la variación media de las distancias o de los tiempos de viaje; ii) se identificaron las limitantes de algunos índices topológicos en la evaluación de la gráfica dual; y iii) se establecen líneas futuras de investigación.

Contenido

Agradecimientos.....	V
Resumen autobiográfico del autor.....	VI
Resumen.....	VII
Contenido.....	8
Lista de tablas.....	10
Lista de figuras.....	12
1 Introducción.....	14
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Planteamiento del problema.....	17
1.3 Justificación.....	18
1.4 Hipótesis.....	18
1.5 Objetivos.....	19
1.5.1 Objetivo general.....	19
1.5.2 Objetivos específicos.....	19
1.6 Alcances.....	19
1.7 Metodología.....	19
1.8 Estructura del documento.....	21
2 Estado del arte.....	22
2.1 Tipos de estudios.....	22
2.2 Representación topológica.....	24
2.3 Índices y medidas en la literatura.....	27
2.4 Identificación de tramos críticos en México.....	31
2.5 Conclusiones.....	32
3 Metodología.....	34

3.1	Índices para la caracterización de la RNCM	35
3.2	Definición de la sub-red considerada	39
3.3	Asignación del TDPA por tramo carretero	46
3.4	Variación media de las distancias de viaje por carretera	47
3.5	Técnica <i>biclustering</i> para el agrupamiento de tramos carreteros	51
3.6	Programas informáticos considerados	53
3.7	Conclusiones.....	55
4	Resultados	57
4.1	Base de datos de la DGST.....	57
4.2	Red considerada para el análisis	60
4.3	Indicadores de la RNCM	62
4.3.1	Índice alfa	62
4.3.2	Índice de centralidad por intermediación	65
4.3.3	Índice de poder de Bonacich	66
4.3.4	Coefficiente de agrupamiento.....	68
4.3.5	Nodos de articulación	69
4.3.6	Grado	70
4.3.7	Fragmentación.....	72
4.3.8	Centralidad comparada	74
4.4	Agrupamiento de carreteras	76
5	Conclusiones.....	85
	Referencias bibliográficas	87
	Anexo A. Pruebas de correlación	92

Lista de tablas

Tabla 2.1. Relación de artículos e índices considerados en la literatura	28
Tabla 3.1. Zonas Metropolitanas con mayor población, año 2010	48
Tabla 3.2. Estadística operacional origen-destino en servicio de fletamento internacional, 2016	50
Tabla 3.3 Opciones de los parámetros para las pruebas	52
Tabla 3.4 Resumen de programas informáticos identificados	54
Tabla 4.1. Tabla Estados	58
Tabla 4.2. Tabla Tipo de red	58
Tabla 4.3. Descripción de la tabla Carreteras	59
Tabla 4.4. Descripción de la tabla Lugares	59
Tabla 4.5. Descripción de la tabla TDPA.....	59
Tabla 4.6. Descripción de la tabla “indicadores”	61
Tabla 4.7. Carreteras con mayor índice alfa	64
Tabla 4.8. Carreteras con mayor índice de centralidad por intermediación	66
Tabla 4.9. Carreteras con mayor centralidad	68
Tabla 4.10. Carreteras con mayor coeficiente de agrupamiento.....	69
Tabla 4.11. Carreteras con mayor índice de grado	71
Tabla 4.12. Carreteras con mayor nivel de fragmentación.....	74
Tabla 4.13. Lista de carreteras descartadas	77
Tabla 4.14. Resultados de las pruebas de correlación, todos los datos.....	78
Tabla 4.15. Configuración con mayor grado de homogeneidad, datos sin normalizar	80
Tabla 4.16. Resultados de la técnica biclustering, datos sin normalizar	81
Tabla 4.17. Resultados de las pruebas de correlación, datos sin normalizar.....	81

Tabla 4.18. Configuración con mayor grado de homogeneidad, datos normalizados	82
Tabla 4.19. Resultados de la técnica biclustering, datos normalizados	83
Tabla 4.20. Resultados de las pruebas de correlación, datos normalizados.....	83
Tabla 4.21. Comparación de la centralidad por intermediación y la variación media de la distancia y del tiempo de viaje	84

Lista de figuras

Figura 1.1. Países con Tratados y Acuerdos firmados con México 2016	15
Figura 1.2. Importaciones Totales de México 2016	15
Figura 1.3. Exportaciones Totales de México 2016	16
Figura 1.4. Diagrama del proceso.	20
Figura 2.1. Representación dual de las calles	26
Figura 3.1. Vialidades de Aguascalientes consideradas en la RNCM	41
Figura 3.2. Carreteras federales de Aguascalientes consideradas en la RMNT ...	41
Figura 3.3. Carreteras federales y estatales de Aguascalientes consideradas en la RNCP	42
Figura 3.4. Vialidades de la ciudad de Querétaro. (1) Distintos tipos de vialidades. (2) Carreteras de acuerdo a la RNCM	43
Figura 3.5. Vialidades de la ciudad de Querétaro y estaciones de aforo de la DGST	44
Figura 3.6. Vialidades de la ciudad de Querétaro. (Arriba Izq.) Mapa de la DGST. (Arriba Der.) Carreteras de la RMNT. (Abajo Centro) Carreteras consideradas ...	45
Figura 3.7. Ejemplo de los tramos no considerados por la DGST en Aguascalientes	46
Figura 3.8. Diagrama del TDPA tomado en una carretera	47
Figura 3.9 Puertos fronterizos considerados del norte de México	49
Figura 3.10. Puertos fronterizos considerados del sur de México	49
Figura 4.1. Estaciones de aforo del Libro de Datos Viales de la DGST.	57
Figura 4.2 Red considerada para el análisis	61
Figura 4.3. Carreteras que presentan un índice alfa igual a cero	62
Figura 4.4. Carretera Apizaco-Tejocotal (naranja) y Tlaxco-Tejocotal cuota (rojo)	63
Figura 4.5. Niveles de redundancia de la red de carreteras de México	64

Figura 4.6. Niveles de centralidad por intermediación, de la red de carreteras de México	65
Figura 4.7. Niveles de centralidad del índice de poder de Bonacich, de la red de carreteras de México	67
Figura 4.8. Coeficiente de agrupamiento de la red de carreteras de México	69
Figura 4.9. Carreteras que son nodos de articulación en la gráfica dual de la RNCM	70
Figura 4.10. Centralidad de grado en la red de carreteras de México.....	72
Figura 4.11. Niveles de fragmentación en la red de carreteras de México.....	73
Figura 4.12. Centralidad comparada en la red de carreteras de México	75
Figura 4.13. TDPA ponderado en la red de carreteras de México	75
Figura 4.14. Centralidad espectral en la red de carreteras de México	76
Figura 4.15. Carreteras que al simular su bloqueo no permiten calcular el total de rutas	77
Figura 4.16. Aumento de la variación media de la distancia	79
Figura 4.17. Aumento de la variación media de los tiempos	79
Figura 4.18. Niveles de centralidad por intermediación, de la red de carreteras de México	80
Figura 4.19. Carreteras del bicluster 1, datos sin normalizar	82

1 Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes el planteamiento del problema y la justificación del proyecto, así como la hipótesis y los objetivos correspondientes junto con los alcances y la metodología que se siguió para su desarrollo.

1.1 Antecedentes

El comercio global está hoy viviendo uno de los procesos de transformación más importantes de los últimos tiempos. Desde las transformaciones generadas por los atentados terroristas del 11 de septiembre de 2001 en las cadenas de suministro global, el término “globalización en reversa” (reverse globalization o deglobalization en idioma inglés) se ha vuelto un vocablo cada vez más común en el mundo. Si bien desde 2012 en un documento de trabajo titulado: “Reverse globalization and near-sourcing strategies: impacts of crossing times at U.S.-Mexican border on cross-border supply chains” [1], ya analizaban sus posibles impactos para México y los Estados Unidos, la realidad es que ha sido hasta 2016 con la salida de Gran Bretaña de la Europa común, que el término ha cobrado relevancia global, pero en especial, para México.

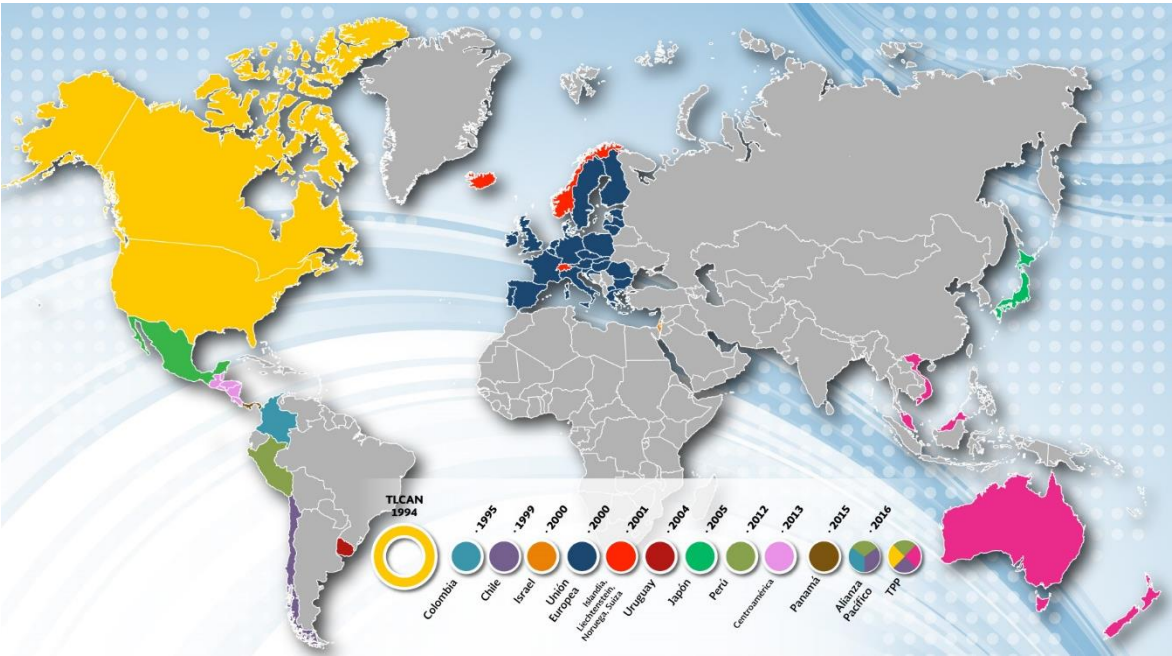
Es así como actualmente, la distribución física de las mercancías se encuentra entre las actividades de la logística que aporta un importante valor agregado a las organizaciones, siempre y cuando se realice de una manera adecuada y oportuna. De hecho: *“el valor agregado estratégico del conocimiento y tecnología logística, queda de manifiesto cuando una organización o país alcanzan una efectividad económica superior a través de la efectiva optimización de los flujos conectando a la oferta con la demanda”* [2]. Para ello, uno de los factores de mayor influencia para el desarrollo logístico de cualquier organización o país, es la infraestructura a través de la cual se mueven dichas mercancías [3].

En este sentido, en México, el Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018 (PNI) [4], describe a la inversión en infraestructura como un tema estratégico y prioritario para México, ya que se considera clave para incrementar la competitividad. De hecho, se establece la importancia de transformar a México en una Plataforma Logística para el Comercio Global. De forma específica, con respecto a la infraestructura de transporte carretero, se estima que ésta facilitó que para el año 2016 se movieron 535’548,000 toneladas de mercancías [5].

Cabe señalar que el Índice de Competitividad Global de 2016-2017 [6] del Foro Económico Mundial, sitúa a México en el lugar 58 de 138 países en materia de competitividad de infraestructura carretera. De hecho, se encuentra por debajo de países como Panamá, Chile y Ecuador. Además, en el mismo índice México ocupa el lugar 57 en cuanto a la calidad de su infraestructura en general.

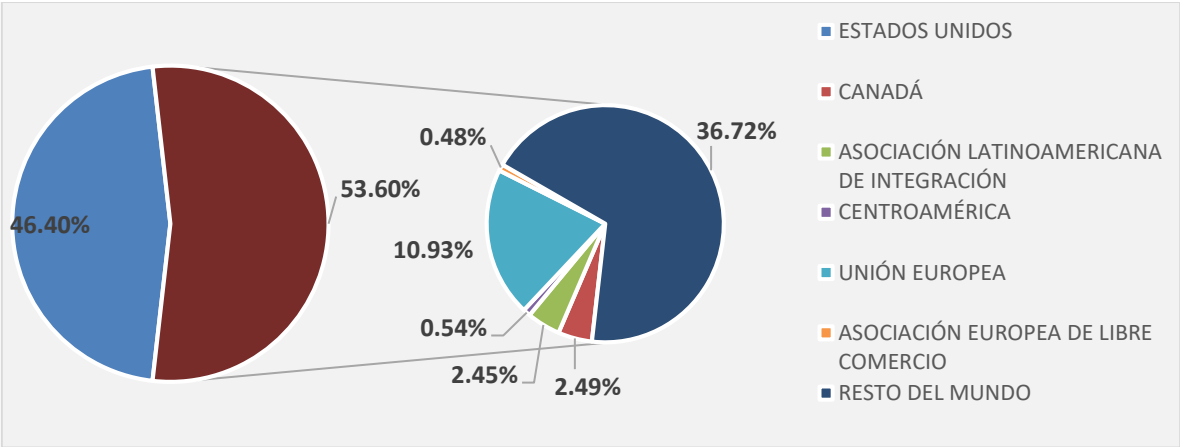
En la actualidad, México cuenta con 12 Tratados de Libre Comercio con 46 países, además de 32 Acuerdos para la Promoción y Protección Recíproca de las

Inversiones y 9 Acuerdos de Complementación Económica y Acuerdos de Alcance Parcial [7]. En la Figura 1.1 se muestran los países con Tratados y Acuerdos firmados con México. En consecuencia, las importaciones totales de México con Estados Unidos en el año 2016 representaron el 46.40% con respecto al total en términos monetarios, como se muestra en la Figura 1.2. En términos de las exportaciones totales de México con Estados Unidos en el año 2016, representaron el 80.94% con respecto al total en términos monetarios, como se muestra en la Figura 1.3.



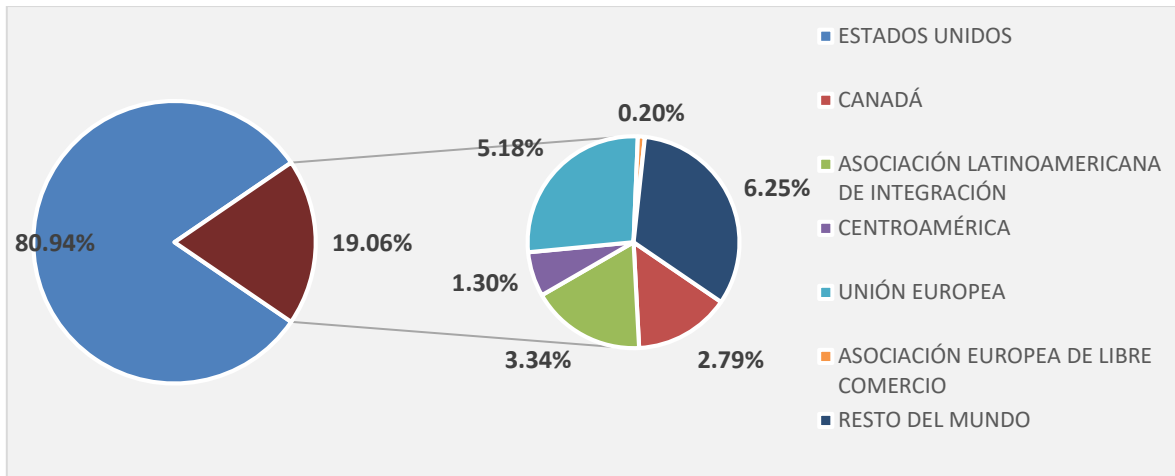
Fuente: Secretaría de Economía [7].

Figura 1.1. Países con Tratados y Acuerdos firmados con México 2016



Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Economía [8].

Figura 1.2. Importaciones Totales de México 2016



Fuente: Elaboración propia con datos de la Secretaría de Economía [8].

Figura 1.3. Exportaciones Totales de México 2016

El panorama anterior permite visualizar de forma general los retos a superar para que México se convierta en una plataforma logística mundial como lo manifiesta dicho PNI. Entre los temas clave, se encuentra tanto el costo de los servicios de transporte, como su conectividad. En cuanto al primero, el PNI planteó promover el desarrollo de una infraestructura de transporte que favoreciera la reducción de costos de transporte y logística, para con ello, dar una mayor efectividad a las actividades económicas en el país. En cuanto al segundo, el PNI planteó mejorar la conectividad de la infraestructura bajo criterios estratégicos y de eficiencia [4]. Entre los cuales se encuentran desarrollo regional equilibrado y conectividad logística. Queda formalmente establecido que para mejorar el diseño y operación de la infraestructura de transporte en México es necesario un enfoque logístico.

Es en éste contexto que el presente trabajo se propone a la Teoría de Gráficas como herramienta de apoyo para conectar las necesidades identificadas, con las acciones de diseño y operación necesarias para superar los retos de transformar a México en una Plataforma Logística para el Comercio Global. Debido a la complejidad de analizar en un solo paso toda la red de transporte de forma integrada incluyendo todos los modos de transporte, el presente trabajo parte del análisis de la red carretera. Para ello, toma como base investigaciones anteriores que hacen uso de la teoría de gráficas para analizar la infraestructura de las redes carreteras y determinar su impacto o relación con diferentes factores, como por ejemplo: i) cambios en el entorno ecológico a través del tiempo provocados por el crecimiento de la red [9]; ii) identificación de tramos importantes y su contribución en la accesibilidad a servicios de emergencia [10]; iii) grado de interrupción que puede provocar un desastre sobre la red carretera [11], entre otros. Sin embargo, se detectó que dentro de la literatura existe una brecha con respecto al estudio de las características topológicas de la infraestructura de transporte desde una perspectiva logística, es aquí donde el presente trabajo busca hacer su mayor contribución al cuerpo de conocimiento.

1.2 Planteamiento del problema

De acuerdo con la CEPAL [12] la eficiencia y capacidad de la infraestructura de transporte tiene un impacto directo sobre la mejora de los servicios de transporte. A su vez, menciona que las mejoras en los servicios de transporte tienden a disminuir los costos de la logística ya que se aumenta la confiabilidad. De hecho dice que una infraestructura de baja calidad provoca consecuencias económicas negativas para las empresas. En la actualidad los estudios de infraestructura están ampliamente desarrollados, sin embargo, el impacto espacial de la infraestructura de transporte sobre las cadenas de suministro es menos conocido. Es de interés del presente trabajo determinar la influencia que tienen las características de la infraestructura de transporte, sobre la robustez de la red carretera desde un enfoque logístico apoyado en la teoría de gráficas.

Actualmente, los análisis de la complejidad de las redes de transporte están ampliamente desarrollados y algunos de ellos toman en cuenta índices socioeconómicos. Sin embargo, dichos análisis se desarrollan sin una visión estratégica o táctica enfocada a la logística del transporte de carga. Además, a nivel nacional no se cuenta con herramientas de soporte a las decisiones para que al momento de hacer un nuevo diseño y simplemente, un rediseño operativo en la infraestructura del transporte, se pueda evaluar su impacto en la operación de las cadenas de suministro que operan a lo largo, por ejemplo de los corredores carreteros.

Con información de la SCT [5], el autotransporte federal es un importante modo de transporte dado que participa con el 4.9 del PIB y a través de éste, se mueve el 81% de carga terrestre y el 56% de carga nacional.

Derivado de lo anterior, en esta investigación se busca determinar la relación entre las características topológicas que presenta la red carretera nacional, con respecto a su robustez, es decir: ¿cómo se puede medir el impacto de la topología de la infraestructura sobre la robustez de un sistema logístico que depende de la red carretera?

Si bien se trata de una pregunta compleja, actualmente las nuevas tecnologías pueden proporcionar herramientas y métodos para analizar redes de gran tamaño. Es el caso del desarrollo hecho por el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) al integrar información confiable de la red carretera del país dentro de un solo proyecto denominado: “*Red Nacional de Caminos de México*” o RNCM. La RNCM, fue desarrollada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), a través del Instituto Mexicano del Transporte (IMT) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los resultados de la RNCM, junto con los índices de teoría de gráficas, pueden producir medidas sobre cómo impacta la estructura de las redes de infraestructura en el desempeño logístico tanto de las organizaciones, como del país en general.

En este sentido, con el interés de alcanzar resultados específicos, se acotó el desarrollo del presente estudio a la red carretera nacional. Dada la importancia de la red carretera nacional en la competitividad económica de México, el presente trabajo desarrollará a través de la caracterización de la red carretera desde la teoría de gráficas, tanto la identificación de la importancia de los tramos carreteros, como la evaluación del impacto cuando se presenta una interrupción en ellos. En especial, el análisis se desarrollará sobre las distancias entre puntos logísticos estratégicos con orientación hacia la exportación dentro del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN).

1.3 Justificación

El uso de la infraestructura de transporte es el soporte para las operaciones logísticas que desarrollan tanto las personas al trasladarse de un punto a otro, como las empresas al mover sus mercancías desde los puntos de producción a los de demanda. Los tiempos de viaje y el rendimiento del transporte dependen, entre otros factores, de las características que posea dicha infraestructura. El impacto de la estructura de la red carretera en México sobre la variación en la distancia-tiempo de viaje, es un tema crítico para la competitividad [13]. En consecuencia la presente investigación proporcionará un sistema de evaluación del impacto de la topología de la infraestructura en el desempeño logístico. Dicho sistema serviría de apoyo para determinar posibles cambios que mejoren la efectividad en la infraestructura, al tiempo que permitiría usar indicadores (de la estructura de la red y puntos críticos) en los procesos de diseño y operación de mediano y largo plazos.

El sistema de evaluación resulta novedoso, ya que se dirigirá principalmente a los tomadores de decisiones tanto en el sector público, como en el privado, que se encuentren involucrados en proyectos de infraestructura carretera. Pero también, en el diseño de rutas. Para ello, se establecerán tres sub-sistemas. En el primero se incluye la definición de los indicadores de estructura de la red. El segundo proporciona información de los puntos críticos. El tercero estima indicadores de la influencia sobre las distancias para la toma de decisiones estratégicas y tácticas en términos de logística.

Las principales innovaciones técnicas de este proyecto surgen en el desarrollo de una solución de software con el objetivo de implementar la información antes descrita en el modelo de la RNCM. De este modo, se tendrá una plataforma informática capaz de apoyar a los tomadores de decisiones en la evaluación, desde la teoría de gráficas, sobre cambios en la infraestructura logística y de transporte tomando en cuenta índices topológicos de la estructura de la red.

1.4 Hipótesis

Si se caracteriza la infraestructura de transporte carretero desde una perspectiva logística y de teoría de gráficas, entonces, se podrá establecer el nivel de robustez de la red carretera nacional.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Caracterizar la infraestructura de transporte desde una perspectiva logística, mediante la teoría de gráficas con el fin de establecer el nivel de robustez de la red carretera nacional.

1.5.2 Objetivos específicos

- I. Caracterizar la infraestructura de transporte desde el punto de vista de la teoría de gráficas, mediante la identificación de índices que describirán la topología de la red.
- II. Identificar arcos con características similares, mediante el agrupamiento de los mismos para establecer su importancia dentro de la red.
- III. Establecer el nivel de robustez de la infraestructura de transporte, mediante el análisis de escenarios, para medir su impacto en la red carretera nacional.

1.6 Alcances

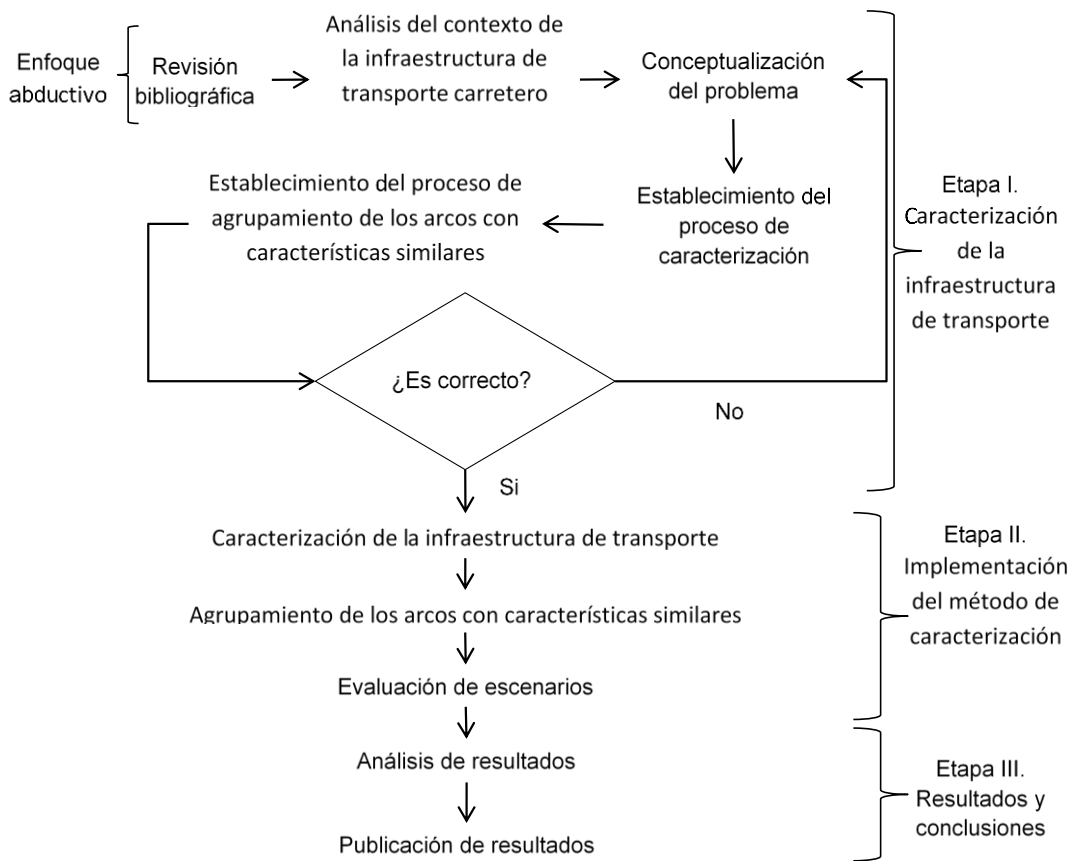
- Se caracterizará la infraestructura de transporte carretero de México, definida dentro del modelo de la RNCM, delimitándola a las carreteras incluidas dentro del Libro de Datos Viales de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST), desde una perspectiva logística con orientación hacia la exportación dentro del TLCAN.
- La influencia sobre la robustez de la infraestructura de transporte será medida a través de la variación media de la distancia, calculada entre las principales zonas metropolitanas con datos del Sistema Urbano Nacional y los puertos fronterizos del norte de México, definidos dentro de la RNCM.

1.7 Metodología

Debido a la complejidad sistémica del problema abordado en el presente trabajo, se decidió adoptar un enfoque de investigación abductivo. El enfoque de investigación abductivo combina aspectos teóricos y empíricos y se define como la creatividad sistematizada o la intuición en la investigación para desarrollar nuevo conocimiento. Este enfoque inicia con la observación de la realidad, con la particularidad de que existe una retroalimentación continua con la información teórica. Es comúnmente usado en casos de estudio y en investigación aplicada, donde se recolectan datos de fuentes primarias (entrevistas, visitas de campo, etc.) que posteriormente se analizan y comparan con información de fuentes secundarias (artículos, libros, etc.) para formar un ciclo en el que se va generando la teoría o el nuevo conocimiento [14].

A continuación se enlistan los pasos definidos para el problema a investigar en el presente trabajo. Los mismos serán descritos con detalle en el capítulo tercero del presente documento. De forma general:

- i. Caracterización de la infraestructura de transporte.
 - a) Revisión bibliográfica de los índices de teoría de gráficas.
 - b) Análisis del contexto de la infraestructura de transporte carretero.
 - c) Conceptualización del problema.
 - d) Establecimiento del proceso de caracterización.
 - e) Establecimiento del proceso de agrupamiento de los arcos con características similares.
- ii. Implementación del método de caracterización en una plataforma informática.
 - a) Caracterización de la infraestructura de transporte.
 - b) Agrupamiento de los arcos con características similares.
 - c) Evaluación de escenarios.
- iii. Resultados y conclusiones.
 - a) Análisis de resultados.
 - b) Publicación de resultados.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1.4. Diagrama del proceso.

1.8 Estructura del documento

El documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: En el capítulo 1 se plantean las bases de la tesis, como son la hipótesis, objetivos y la metodología entre otros apartados base de la investigación. En el capítulo 2 se aborda el estado del arte referente a los distintos estudios que se han desarrollado sobre el análisis de redes carreteras desde la teoría de gráficas. Se incluyen y analizan las representaciones en su forma de gráfica, así como los distintos índices y medidas consideradas, así como una aproximación de identificación de tramos críticos para el caso mexicano. En el capítulo 3 se describe a detalle la metodología propuesta para el alcance de los objetivos, como son: i) los índices que se evaluaron; ii) la delimitación y definición de la red carretera considerada para el análisis; iii) la técnica de agrupamiento de las carreteras de acuerdo a los indicadores que presentan; y iv) los programas informáticos considerados. En el capítulo 4 se muestran los resultados de la investigación, como son los indicadores de cada carretera, el análisis y la interpretación correspondiente. Finalmente, en el capítulo 5 se incluyen las conclusiones correspondientes destacando las contribuciones del presente trabajo al cuerpo de conocimiento y práctica en logística, así como las futuras líneas de investigación identificadas.

2 Estado del arte

Las redes cuyos nodos se encuentran en posiciones precisas, en espacios euclidianos de dos o tres dimensiones, reciben el nombre de redes espaciales y las redes de transporte se encuentran dentro de esta clasificación. A diferencia de las redes no espaciales, como las redes sociales, presentan características y atributos que deben ser tomados en cuenta en un análisis de su estructura [15].

De este modo, con el interés de comprender mejor la estructura de las redes de transporte, se desarrolló una amplia revisión de la literatura. Es así como el objetivo de este capítulo es el de identificar y discutir los índices, medidas, representaciones gráficas y los tipos de análisis que se han tomado en cuenta para realizar estudios de una red carretera a nivel país, mediante la teoría de gráficas. Se consultaron fuentes de trabajos relacionados con la teoría de gráficas aplicada a las redes de transporte. De hecho, se realizaron búsquedas en tres bases de datos científicas: i) Springer (Springer Link); ii) Elsevier (Science direct); y iii) Wiley (Wiley Online Library). Las consultas se realizaron desde la interfaz de búsqueda avanzada de cada página web, las palabras clave que se usaron son “Graph theory” y “road network”. El periodo de búsqueda establecido abarcó de Enero de 2000 a Abril de 2016. A continuación se incluye el análisis del estado del arte correspondiente.

El análisis considera también las características con las que se encuentra modelada la RNCM (Red Nacional de Caminos de México). El modelo de la RNCM se basa en el estándar ISO 14825:2011 que especifica el modelo conceptual y lógico de los datos de bases de datos geográficas para Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS, por sus siglas en inglés). Lo anterior incluye la especificación del contenido potencial de las bases de datos, su representación y la información relevante a incluir [16].

2.1 Tipos de estudios

Los trabajos analizados durante la revisión de la literatura proponen diferentes tipos de estudios de las redes viales, en esta sección se presenta un resumen de éstos y se comparan los objetivos, resultados y conclusiones a los que llegaron los diferentes autores.

En los estudios analizados se identificó varios objetivos: i) la medición de las características topológicas y la clasificación a través de éstas [17, 18]; ii) la determinación de la relación del desarrollo de la red y el entorno geográfico [9, 19]; iii) la identificación de vialidades o intersecciones importantes de la red [13, 10, 11, 20]; iv) el desarrollo de nuevos índices y medidas [21]; v) análisis espacio-tiempo de tiempos de viaje por la red carretera [22]; vi) y la definición de metodologías para la generalización de la red [23, 24, 25].

Estrictamente hablando, la mayoría de estos incluyen la medición de características topológicas, sin que este sea su objetivo principal. Lo trascendental de estas investigaciones es la razón para realizar dichas evaluaciones. En algunos casos se

busca determinar la relación entre los índices y alguna otra variable que pudiera ser afectada. Por ejemplo, en el trabajo de Patarasuk [9] se buscó determinar la relación entre el desarrollo de la red carretera (medida a través de índices de conectividad) y el material físico en la superficie de la tierra (en inglés *land-cover* e incluye la vegetación, agua, arboles, asfalto, suelo, etc.), a través de pruebas de correlación estadística y de esta forma evaluar el efecto negativo del desarrollo vial sobre el entorno ecológico.

En cuanto a la identificación de vialidades importantes en la red, uno de los principales propósitos de dichas investigaciones es determinar el impacto que tendría el bloqueo de estos arcos sobre alguna característica que se decida evaluar. Por ejemplo, Novak y Sullivan [10] evaluaron la importancia de los arcos de la red de acuerdo a su contribución en la accesibilidad a servicios de emergencia. También en este sentido se encuentra el trabajo de Freiria et al. [13], en el que se midió la importancia de los arcos de acuerdo a su impacto en la pérdida de conectividad de la red y es medido a través del incremento de la distancia geodésica media entre los nodos. Ellos proponen para futuras investigaciones tener en cuenta variables como la capacidad de servicio. Bono y Gutiérrez [11] por su parte, definieron un método para evaluar el grado de interrupción que puede provocar un desastre sobre la red carretera, en específico se midió la pérdida de accesibilidad en áreas urbanas de Haití, durante el sismo del año 2010. Análisis de este tipo pueden ser aplicados a la RNCM para mejorar el rendimiento del peor caso, i.e. el que influya más en la accesibilidad o conectividad de la red. Otros ejemplos de este tipo de análisis se pueden encontrar en los trabajos de Schintler et al. [26], Dunn y Wilkinson [27].

La identificación de patrones y clasificación de las redes es otro tipo de estudio recurrente en la literatura. Liu y Zhao [17] analizaron desde la perspectiva de circularidad (número de ciclos presentes), accesibilidad e in-dirección (relación entre la distancia geométrica de dos nodos y su distancia a través de ruta más corta en la red, también conocida en la literatura como *circularity*), 16 redes de distritos históricos en Japón y lograron clasificarlos en 4 tipos de acuerdo a su formación y las características topológicas. Otro caso es el de Freiria et al. [13] en el cual determinaron siete grupos de acuerdo al análisis de agrupamiento sobre las medidas de centralidad, cohesión y densidad consideradas, definiendo así seis grupos de acuerdo a su impacto sobre la conectividad de la red y uno formado por los elementos que no se lograron clasificar. También se ha llegado a proponer nuevas medidas para alcanzar los objetivos de los estudios, como es el caso de Xie y Levinson [21] quienes definieron nuevas medidas de patrones de conexión. La realización de estudios de identificación de patrones y su clasificación sobre la RNCM, permitiría caracterizar y agrupar las carreteras, analizar las relaciones de los grupos con los atributos que presentan los elementos (tipo de vialidad, distancia, velocidad, jurisdicción, número de vías, etc.) y así llegar a comprender de manera más profunda la estructura de la red.

En el caso de la generalización de las redes, se tiene como objetivo el reducir los datos de la red manteniendo las características importantes de ésta, de tal forma que el proceso sea controlado, predecible y repetible [23]. Para justificar la

reducción de la red se evalúan los arcos de acuerdo a ciertos factores que se establecen en el método, para determinar su nivel de importancia y entonces seleccionar los más importantes. Zhang [24], por ejemplo, seleccionaron las carreteras más destacadas basándose en un análisis de la conexión de la red, el cual lo describe como un proceso de cuatro pasos. Primero determinaron los elementos a evaluar, agrupando segmentos de la red de acuerdo a sus atributos. Si en un nodo de la red convergen varios arcos, los compara en parejas y de acuerdo al principio de “buena continuación” (el cual se explica en la Sección II.B) se van formando los segmentos de carretera a tomar en cuenta (los cuales son conocidos en la literatura como *strokes*). Segundo, se evalúa el número de conexiones que presenta cada *stroke* con respecto al resto de los elementos. Tercero, los *strokes* son ordenados de acuerdo a su longitud, número de conexiones y atributos. Tercero, dependiendo del orden que se obtenga con base en las características anteriores (tomar en cuenta todas o una combinación de ellas), se establece un grado de reducción (relación entre número de *strokes* que se seleccionarán y el total) para seleccionar los elementos más destacados de la red.

La generalización de las redes puede ser implementada en el análisis de la RNCM para determinar la porción de la red que sería analizada, ya que su nivel de detalle puede llegar a complicar dicha tarea. Es importante ver que el método de generalización no es infalible y puede dar como resultado caminos o porciones de red desconectadas.

2.2 Representación topológica

Los casos de estudio que se abordan en la literatura son variados y de distintas envergaduras, en los artículos consultados se pueden encontrar análisis de porciones de redes viales de una urbe [17, 10, 23, 11, 20], redes carreteras a nivel municipal o provincia [13, 9, 18, 24, 19] y de redes carreteras a nivel país [15].

A continuación se introduce el concepto de matriz de adyacencia, además de identificar los distintos enfoques que se han utilizado para representar las redes en su forma topológica y de presentar una discusión sobre su posible aplicación en la RNCM.

La matriz de adyacencia $A = [a_{ij}]$ de una gráfica G , es la matriz cuadrada con filas y columnas etiquetadas por los vértices, y entradas:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el vertice } i \text{ y } j \text{ se relacionan por un arco} \\ 0 & \text{si el vertice } i \text{ y } j \text{ no se relacionan por un arco} \end{cases}$$

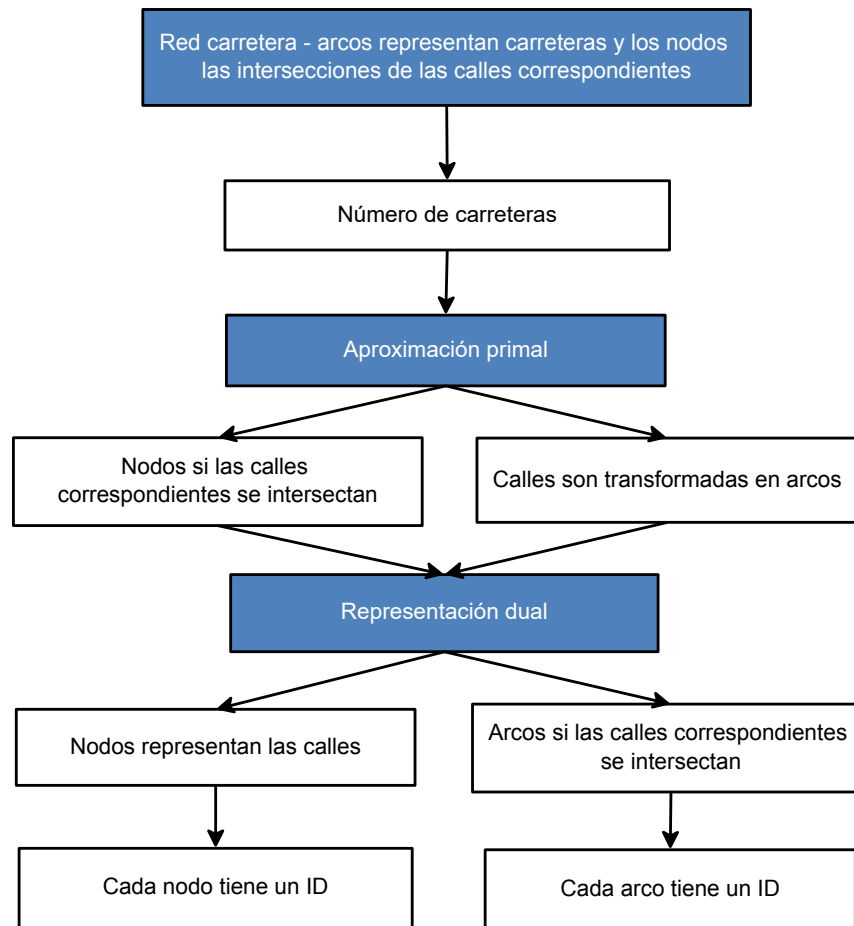
Por convenio general los elementos a_{ij} de la diagonal de la matriz se definen igual a cero y la matriz de adyacencia se denota como A [28].

La representación topológica más común de las redes de transporte, es aquella donde las poblaciones, intersecciones de las carreteras o algún otro lugar de interés son representados como nodos, y las carreteras que los comunican son arcos de la

gráfica. Porta et al. [29] definieron dicha representación como representación gráfica primal de la red. Entre los trabajos que hacen uso de esta representación se encuentra el análisis realizado por Liu y Zhao [17] para representar distritos históricos de Japón o el estudio de Patarasuk [9] en las carreteras de la provincia de Lop Buri en Tailandia. Para aplicar esta representación en la RNCM es necesario tomar en cuenta que el modelo se encuentra dividido en 619,714 líneas, entonces se tiene que decidir si cada una de las uniones existentes se toma como un nodo o si se desea tomar otro tipo de elementos como nodos, como por ejemplo las ciudades [18].

En la representación primal también es necesario decidir si la red se considerará dirigida o no dirigida. La RNCM cuenta con información sobre el sentido de los arcos carreteros, dividiéndolos en tres grupos: “*cerrada en ambos sentidos*”, “*dos sentidos*” y “*un sentido*”. En su investigación, Bono y Gutiérrez [11] consideraron la red carretera de Haití como no dirigida, basándose en el pequeño porcentaje de arcos de un solo sentido y además argumentan que en circunstancias de emergencia por desastres, los vehículos no necesariamente se encuentran limitados por las reglas de tráfico.

En el trabajo de Freiria et al. [13], el caso de estudio fue la red carretera del municipio de Coimbra en la región central de Portugal. Para analizar esta red se eligió una representación gráfica dual, la cual fue propuesta inicialmente por Jiang y Claramunt [30] y modificada por Porta et al. [29]. La idea básica de la representación gráfica dual es transformar las carreteras en nodos y las intersecciones en arcos de la gráfica. La representación original de Jiang y Claramunt [30] se encuentra orientada en el nombre de las carreteras para determinar los arcos que serán considerados como un solo nodo [30], este es su principio de continuidad. Esta representación permite centrar el análisis en las carreteras en lugar de sus intersecciones ya que algunos índices y medidas, como el grado [13], se enfocan en los nodos y no en los arcos de la red. Por su parte, Porta, Crucitti y Latora [29] argumentaron que dicho principio de continuidad provoca una pérdida de coherencia ya que, entre otras observaciones, los nombres de las calles no siempre son significativos o fiables. Entonces, ellos proponen usar el principio de continuidad llamado “*buena continuación*” en su modelo llamado Negociación de la Continuidad en la Intersección (ICN, Intersection Continuity Negotiation) el cual básicamente se basa en el ángulo que forman las carreteras tomadas en pares, las cuales comparten una misma intersección: si el ángulo convexo (ángulo formado por dos semirrectas, mayor a 0° y menor a 180°) de un par es mayor al de todos los demás pares, entonces ese par forma un solo arco [29]. Sin embargo, Freiria, Ribeiro y Tavares argumentaron que este método puede ser engañoso en ciudades con una geometría compleja en la estructura de la red, por lo que propone un enfoque como el de Jiang y Claramunt pero asignando un identificador numérico único a cada carretera [13]. La representación gráfica dual ha sido considerada también en los trabajos de Shi y Lu [31] y Erath et al. [15]. En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de la representación primal y dual propuesta por Freiria et al.



Fuente: Freiria et al. [13]

Figura 2.1. Representación dual de las calles

La implementación de la representación gráfica dual en la RNCM, con el principio de continuidad basado en el nombre es posible, ya que el modelo de la red incluye los nombres de los tramos de las principales carreteras federales y algunas estatales [16]. Con respecto a la variación propuesta por Freiria, Ribeiro y Tavares también es posible implementarla, ya que cada tramo cuenta con su propio identificador. Por otro lado, habría que analizar la viabilidad de aplicar el enfoque de Jiang y Claramunt [30] en una red de la envergadura de la RNCM, ya que por su nivel de detalle se tendrían que analizar un gran número de pares carreteros.

Es importante hacer notar que la representación gráfica dual no es siempre necesaria para enfocarse en la evaluación de los arcos, como se puede apreciar en el trabajo de Novak y Sullivan [10]. Dichos autores proponen un índice de accesibilidad a servicios de emergencia que evalúa la importancia de los arcos en una representación primal de la red.

Otro factor a considerar en la implementación de la RNCM es si se debe suponer su representación como una gráfica planar o no planar. Las gráficas planares son aquellas que forman vértices en todo cruce de arcos y las no planares son aquellas

donde existe la opción de que si dos arcos se cruzan, no necesariamente forman un vértice [32]. La RNCM se encuentra modelada como una red no planar ya que toma en cuenta las intersecciones a desnivel, no representándolas como una “unión” (intersección). Existen estudios donde se llega a suponer que la red es planar [9], sin embargo en la evaluación de algunos índices, por ejemplo el grado de los vértices, se podría llegar a reportar resultados incorrectos al considerar intersecciones entre carreteras a desnivel.

2.3 Índices y medidas en la literatura

Los índices y medidas usados en la literatura evalúan y se pueden clasificar principalmente de acuerdo a los siguientes conceptos: conectividad y centralidad. A pesar de tratarse de conceptos bien conocidos y desarrollados, no existe un consenso de cómo deben ser medidas dichas características en las redes. Con respecto a esta afirmación, Novak y Sullivan [10] se expresan así respecto a la medición de la accesibilidad. En esta sección se resumen los índices y medidas que se han considerado para realizar los estudios analizados y se identifican los de mayor consenso con base en el número de publicaciones que los han usado. También se resumen los datos que se deben considerar para su aplicación en el análisis de redes carreteras.

Dentro de la muestra de los artículos consultados durante la presente investigación, en dieciséis de ellos [17, 18, 9, 19, 13, 10, 20, 21, 15, 26, 27, 30, 31, 33, 34, 35] se ubicaron un total de cuarenta y un (41) índices o medidas. De estos, solo diecinueve (19) son considerados en más de un trabajo, de los cuales solo los índices alfa (α), beta (β), gama (γ), el grado de los vértices y la centralidad por intermediación son considerados en cuatro o más investigaciones. En la tabla Tabla 2.1 se muestra un resumen de los índices y medidas considerados en la literatura.

Entre las medidas utilizadas con el objetivo de clasificar la red carretera se encuentran el número ciclomático, los índices alfa (α), beta (β), gama (γ) y el grado de los vértices.

El número ciclomático es una medida de conectividad e indica el total de ciclos presentes en la gráfica de la red (carreteras que en su conjunto forman un ciclo). Su cálculo se realiza con la siguiente fórmula:

$$\mu = e - v + p \quad (1)$$

donde v y e son el número de vértices y arcos respectivamente, y p es el número total de componentes que forman la red (sub-gráficas). Cuando todos los vértices de la red se encuentran comunicados con el resto, es decir existe un camino entre cualesquiera dos vértices (redes conexas), entonces p es igual a uno.

Tabla 2.1. Relación de artículos e índices considerados en la literatura

Artículo	Índices y medidas
Schintler et al. [26]	Centralidad de intermediación
Erath et al. [15]	Centralidad de intermediación, Ringness, Webness, Grado de circuitos, Grado de arborescencia, Grado de centralidad normalizada, Centralidad por cercanía, Centralidad por cercanía ponderada, Centralidad por rectitud, Centralidad por eficiencia, Ponderación con demanda de viaje, Ponderación que refleja la población
Freiria et al. [13]	Centralidad de intermediación, Alfa, Índice de poder de Bonacich, Índice de agrupamiento, Nodos de articulación, Grado, Fragmentación
Su et al. [18]	Grado
Jiang y Claramunt [30]	k - coeficiente de agrupamiento
Morgado y Costa [33]	Alfa, Beta, Gama, Número ciclomático, Índice Zagozdzon, Diámetro, Índice de accesibilidad de Shimbel, Índice de accesibilidad media de Shimbel, Índice de dispersión, Índice de dispersión media
Novak y Sullivan [10]	CCA
Dunn y Wilkinson [27]	Centralidad de intermediación, Centralidad por cercanía, Grado, Longitud media de los caminos más cortos
Liu y Zhao [17]	Alfa, Beta, Gama, Número ciclomático, Numero de ciclos promedio, Accesibilidad media, Dispersión media, Densidad carretera, Densidad nodal, Taza de desvíos, Taza media de desvíos
Cardozo et al. [34]	Alfa, Beta, Número ciclomático, Índice de accesibilidad de Shimbel, Índice de dispersión, Dispersión media, Número Asociado o de Köning
Herce [35]	Ponderación que refleja la población, Beta, Diámetro, Densidad carretera, Centralidad geográfica
Shi y Lu [31]	Índice de agrupamiento, Grado, Longitud media de los caminos más cortos, Grado medio
Xie y Levinson [21]	Ringness, Webness, Grado de circuitos, Grado de arborescencia, Beltway
Patarasuk [9]	Alfa, Beta, Gama
Liu et al. [19]	Alfa, Beta, Gama
Duan y Lu [20]	Centralidad por cercanía, Grado, Longitud media de los caminos más cortos

El índice alfa (α) es una medida de conectividad y evalúa el número de ciclos presentes en la red respecto al número máximo de ciclos que podrían presentarse. Su valor varía entre 0 y 1, y presentará un valor alto si existe un alto número de ciclos. Su cálculo en redes planares es a través de la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{e - (v - p)}{2v - 5} \quad (2)$$

donde v , e y p son el número de vértices, arcos y componentes, respectivamente. Este índice es un indicador de la complejidad de la red en términos de redundancia.

El índice beta (β) mide el nivel de conectividad de una red y se calcula por la relación entre el número de arcos (e) sobre el número de vértices (v). La fórmula es la siguiente:

$$\beta = \frac{e}{v} \quad (3)$$

Las redes inconexas presentan valores menores que 1. Las redes conectadas con un solo ciclo, presentan un valor de 1. Al compararse con el valor máximo que se puede llegar presentar en la red es posible calcular su porcentaje de conectividad actual [34]:

$$\text{máx } \beta = n * (n - 1)/2 \quad (4)$$

Por otro lado, el índice gamma (γ) es una medida de conectividad que considera la relación entre el número de arcos presentes y el número de arcos posibles. El valor de gama se encuentra entre 0 y 1, donde un valor igual a 1 indica que la red se encuentra completamente conectada. La fórmula es la siguiente:

$$\gamma = \frac{e}{3(v - 2)} \quad (5)$$

donde v y e son el número de vértices y arcos, respectivamente.

El grado (degree) de un vértice es el número de conexiones directas entre el vértice evaluado y el resto. Se considera una medida de centralidad cuya fórmula es:

$$d(i) = \sum_j m_{ij} \quad (6)$$

donde

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si existe un arco entre los vértices } i \text{ y } j \\ 0, & \text{si no existe un arco entre los vértices } i \text{ y } j \end{cases} \quad (7)$$

La centralidad de grado no toma en cuenta la condición del camino, suponiendo que todos presentan las mismas condiciones [13].

Patarasuk [9] y Liu et al. [19] coinciden en elegir los índices alfa (α), beta (β) y gama (γ) para sus trabajos de investigación sobre la relación del desarrollo de la red carretera y el entorno geográfico.

Para la identificación de vialidades o intersecciones importantes de la red, algunos de los índices que se identifican son el de centralidad por cercanía, centralidad por intermediación y el grado de los vértices. Las medidas de centralidad son propuestas en la literatura como una forma de identificar las carreteras más importantes [13].

La centralidad por cercanía (C_c) mide el inverso de la distancia media más corta de un nodo i a todos los otros nodos de una red dada. La fórmula es la siguiente:

$$C_c = \frac{N - 1}{\sum_{j=1; i \neq j}^N d_{ij}} \quad (8)$$

Donde N es el número total de vértices y d_{ij} es el camino más corto entre los vértices i y j . Erath et al. [15] argumentan que una desventaja de esta medida es su dependencia directa con el tamaño de la red lo cual hace que sea imposible comparar redes de escala diferente.

El índice de centralidad por intermediación de un vértice (C_i^B), es el número de caminos más cortos que pasan a través de éste. La fórmula correspondiente es:

$$C_i^B = \frac{1}{(N - 1)(N - 2)} \sum_{j,k=1; j \neq k; k \neq i}^N \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (9)$$

donde n_{jk} es el número de caminos más cortos entre los vértices j y k , y $n_{jk}(i)$ es el número de caminos entre j y k , los cuales pasan a través del vértice i . A diferencia de la centralidad de grado, que solo considera el número de caminos directos sin importar su longitud, este índice considera la longitud de los caminos que pasan por el vértice para determinar su nivel de importancia, pero solo en el caso de la representación primal de la gráfica. Esto debido a que en la representación dual, como ya se mencionó, los arcos carreteros son vértices y las intersecciones son arcos de la gráfica.

De acuerdo con Novak y Sullivan [10] la accesibilidad es usada también para evaluar la vulnerabilidad y confiabilidad de las redes carreteras degradadas. Índices como alfa (α), beta (β) y gama (γ) son usados comúnmente para medir los niveles de circuitos presentes, la complejidad o la conectividad [9].

Como una medida de la eficiencia global de la red de transporte, se cuenta con la longitud media de los caminos más cortos. La fórmula es la siguiente:

$$L = \frac{1}{N(N - 1)} \sum_{i,j=1; i \neq j}^N d_{ij} \quad (10)$$

donde N es el número de vértices en la red y d_{ij} es el camino más corto entre los vértices i y j . Valores pequeños de L se interpretan como distancias pequeñas entre los vértices y por lo tanto un menor tiempo de viaje, suponiendo un flujo constante.

Una medida de poder o influencia de los elementos de la red es la centralidad de vector propio. Para introducir dicho concepto, es necesario enunciar primero el teorema de Perron-Frobenius:

Si $A_{n \times n}$ es una matriz primitiva¹ y no negativa, entonces hay un valor propio λ_1 tal que:

- i. λ_1 es real, positivo y es raíz simple de la ecuación característica,
- ii. $\lambda_1 > |\lambda|$ para cualquier valor propio $\lambda \neq \lambda_1$,
- iii. λ_1 tiene un único vector propio u positivo.

El vector propio u del teorema anterior, es nombrado en el trabajo de De la Peña et al. como función de centralidad espectral:

$$u(x) = u_x, \quad x = 1, \dots, n \quad (11)$$

donde u_x es el elemento x del vector propio u de una red G cuya matriz de adyacencia es A . Se interpreta la función $u(x)$ como una medida de la complejidad de la red G en el nodo x [36]. La centralidad espectral de un nodo se puede ver como proporcional a la suma de las centralidades de sus vecinos en la gráfica [37, 28]. En el trabajo de Straffin [28] se pueden encontrar tres justificaciones de por qué el vector propio se puede usar para ponderar la importancia de los vértices dentro de una red.

También se pueden realizar análisis estadísticos de la red carretera, como el realizado por Su et al. [18] en el cual se evaluó la presencia de la propiedad libre de escala en la red de un grupo de ciudades en la provincia de Jiangsu de China, con respecto al grado de los vértices. Una red con la propiedad libre de escala presenta en la mayoría de sus nodos un número pequeño de arcos y únicamente un número reducido de vértices presenta un grado alto de intersecciones. Dicha propiedad se encuentra presente en redes complejas y en el caso de una red de transporte, es importante ya que significa que la red es resistente a obstrucciones que puedan ocurrir de manera aleatoria en las intersecciones, como en los desastres naturales.

2.4 Identificación de tramos críticos en México

En la publicación técnica no.354 titulada “*Planeación de infraestructura del transporte: Identificación de tramos críticos para el funcionamiento de redes carreteras*”, Gradilla [38] propuso una metodología para la identificación de los tramos críticos de la red federal de carreteras de México. Esta metodología la aplica en un caso utilizando las carreteras pavimentadas del Inventario Nacional de Infraestructura de Transporte (INIT) 2007. Como resultados se obtuvo una jerarquía de los tramos carreteros tomando en cuenta 3 criterios:

1. **Conectividad.** Criterio medido a través del índice de centralidad por intermediación;

¹ Una matriz primitiva se define como aquella que es no negativa y existe una potencia en la que sus entradas son positivas.

2. **Accesibilidad.** Identifica los nodos que son críticos para el funcionamiento de la red de carreteras al disminuir los niveles de accesibilidad de los nodos en su ausencia;
3. **Tiempo de viaje.** Establece la importancia de cada tramo carretero de acuerdo al aumento del tiempo de viaje total del sistema al obstruirse dicho tramo.

Cada criterio forma parte del índice propuesto para la jerarquización de tramos carreteros. Al igual que en el presente trabajo, se enfoca en la medición de las consecuencias de la obstrucción total de los tramos. Gradilla [38] propuso que este índice sea tomado en cuenta para priorizar la rehabilitación o mantenimiento de los tramos carreteros cuando sufran afectaciones, ya sea a consecuencia de un desastre natural o por el mismo uso del tramo. También propone su uso para determinar los tramos potenciales a tomar en cuenta para un aumento en su capacidad.

En su trabajo, Gradilla [38] menciona que el enfoque de eficiencia social empleado para generar políticas de transporte, considera que las carreteras más importantes son las que presentan un mayor uso. Así, menciona que se podría hacer uso del tránsito diario promedio anual (TDPA) en la identificación de tramos críticos, sin embargo su metodología no lo toma en cuenta. El TDPA también es considerado para la gestión del mantenimiento realizado por la Dirección General de Conservación de Carreteras (DGCC) de la SCT, a través del software HDM-4, el cual de acuerdo a Gradilla [38], solo se enfoca en el análisis de costo-beneficio y no incluye ningún elemento para estimar el impacto de dichos tramos en el funcionamiento de toda la red.

Por este motivo se pretende integrar el uso de la información incluida dentro del informe anual de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la SCT en el Libro de Datos Viales de la Red Nacional de Carreteras Pavimentadas. Dicha información, se considera de importancia para determinar cuándo un tramo carretero deja de prestar un nivel de servicio adecuado en relación a su volumen de demanda. De acuerdo con la SCT, las características técnicas de los caminos se encuentran determinadas en parte por el tránsito promedio anual (TDPA) [39].

La inclusión de estos datos en el análisis se explica en detalle en el siguiente capítulo dedicado a la presentación de la metodología utilizada, así como a los índices definidos para la evaluación. Además, se presentan las redes seleccionadas para determinar los tramos carreteros a analizar cuya principal característica que presentan es la capacidad de circulación del transporte federal de carga. Y en general se detallan cada uno de los pasos propuestos para el logro de los objetivos planteados en el capítulo 1.

2.5 Conclusiones

En el presente capítulo se abordaron los tipos de estudios que se pueden encontrar en la literatura sobre el análisis de redes viales desde la teoría de gráficas. Se

observan a groso modo 6 distintos objetivos de los trabajos, entre ellos la identificación de vialidades o intersecciones importantes de la red para su funcionamiento normal, sin embargo no se encontró alguno en la muestra enfocado a la logística del territorio correspondiente.

También se describen las dos representaciones topológicas que se han tomado en cuenta para los análisis. Siendo la representación dual de la gráfica la más reciente y la que será considerada en la presente investigación por su enfoque en la evaluación de los tramos carreteros en lugar de las intersecciones.

En cuanto a los índices y medidas usados en la literatura, no existe un grupo de ellos que sean propuestos como básicos para un análisis. Existen un gran número de índices y medidas, se identificaron 41 diferentes en la muestra de artículos. Es necesario considerar los objetivos de la investigación y la información que pueden dar como resultado cada índice o medida para su elección.

Y por último se mostró un caso de estudio de tramos críticos en la red carretera nacional, sin embargo no se basa en la teoría de gráficas, dejando así la oportunidad de comparar dichos resultados con los de la presente investigación.

3 Metodología

De la necesidad de mejorar la conectividad de la RNCM bajo criterios estratégicos desde una perspectiva logística, se concluyó la necesidad de analizar la influencia de la infraestructura del transporte de carga sobre la robustez de la red, mediante la teoría de gráficas. En el presente capítulo se describirá a detalle el procedimiento de aplicación de cada uno de los pasos considerados en la metodología propuesta en el primer capítulo. El proceso a continuación descrito se basa en el trabajo de Freiria, Ribeiro y Tabares [13].

Así, mediante la revisión de la bibliografía se detectaron los índices a tomar en cuenta para la caracterización de la red. También se identificó la representación topológica a considerar en el análisis, junto con algunas consideraciones adicionales. Por lo que se consideró la representación dual de la gráfica en la que las carreteras definidas por la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) pasaron a ser representadas por nodos de la gráfica. Es importante enfatizar que en el resto del capítulo los arcos carreteros se entenderán como nodos o vértices de la correspondiente representación dual de la red carretera y se hará uso de ambos términos para hacer referencia a los mismos.

Del análisis del contexto de la infraestructura carretera nacional se determinó la porción de red a tomar en cuenta para el análisis. Al encontrarse enfocado en el autotransporte federal de carga, se decidió considerar solo los tramos de la red por los que este puede transitar. Dichos tramos se definen dentro del Libro de Datos Viales de la DGST [40], el cual considera tramos carreteros pavimentados de tipo federal y estatal.

Además, a partir de la revisión bibliográfica se logró determinar tanto el proceso de caracterización de la red, como el de agrupamiento y evaluación de escenarios para establecer el nivel de influencia de los tramos carreteros sobre la robustez de la infraestructura de transporte. Este proceso se llevó a cabo con base en la técnica **biclustering**, la cual permite agrupar arcos considerando más de una propiedad en común.

Para el análisis de la variación media de las distancias se consideraron como origen las principales zonas metropolitanas de acuerdo a la población total registrada dentro del Catálogo Sistema Urbano Nacional 2012. Para los puntos destino, además de considerar los principales puertos fronterizos del norte de México, se decidió incluir en el análisis otros puntos importantes para el comercio exterior del país. Lo anterior sobre todo a que del desarrollo de la presente investigación, se llevaba a cabo la re-negociación del TLCAN y en consecuencia, con el interés de aportar elementos de valor ante la incertidumbre que se generó en los actores logísticos.

3.1 Índices para la caracterización de la RNCM

Uno de los objetivos del presente trabajo es determinar los tramos carreteros más importantes de la red. Con esta meta en consideración, los indicadores seleccionados se enfocaron en medir la centralidad, la cohesión y la densidad [13] de la red. En este sentido, se puede mencionar el trabajo de Freiria et al., quienes establecen siete indicadores para identificar los arcos que presentan propiedades como una mejor posición estratégica dentro de la red, así como el número de arcos con que se involucra y el grado de caminos alternos presentes o su nivel de importancia con respecto a la importancia de los arcos vecinos. Los indicadores considerados son: i) el índice alfa; ii) índice de centralidad por intermediación; iii) índice de poder de Bonacich; iv) coeficiente de agrupamiento; v) nodos de articulación; vi) el grado; y vii) fragmentación.

El índice alfa, como se mencionó en la sección anterior, tiene una gran aceptación como indicador de la complejidad de la red en términos de redundancia, ya que ayuda a determinar el grado de caminos alternos presentes en la red. Se ha utilizado en investigaciones para medir de forma cuantitativa las propiedades de la estructura de las redes carreteras y explorar la relación entre el desarrollo de la red y propiedades espaciales adicionales [17, 34]. Freiria y sus colaboradores proponen un cambio en la fórmula del índice alfa para evaluar cada nodo en lugar de la red en su totalidad, definiéndolo como sigue:

$$\alpha_i = \frac{\text{número de circuitos}_i}{\text{máximo número posible de circuitos}_i} = \frac{l - n + 1}{2n - 5} \quad (12)$$

En su trabajo mencionan que es la relación entre el número de circuitos que incluyen al nodo i entre el máximo número posible de circuitos que incluirían al nodo i . Obsérvese que la última fórmula corresponde a la evaluación del índice alfa en toda la red y no por nodo. También comentan los autores mencionados, que para el cálculo de todos los índices se recurrió al software UCINET. Sin embargo, en la documentación no se logró encontrar dicho procedimiento, por lo que la fórmula y la forma de evaluación de cada nodo no quedan claros.

En consecuencia, se buscó definir una fórmula para evaluar cada nodo de acuerdo a lo que proponen Freiria y sus colaboradores. Para ello se interpretó el siguiente párrafo del artículo correspondiente:

“ α_i is equal to the number of circuits of node i divided by the maximum possible number of circuits involving node i , where l is the number of links and n is the number of nodes” [13].

Por lo que se plantean las siguientes fórmulas para gráficas planares y no planares respectivamente:

$$\alpha_i = \frac{(l_1 - n_1 + 1) - (l_2 - n_2 + 1)}{(2n_1 - 5) - (2n_2 - 5)}, \text{ para una gráfica } G \text{ planar} \quad (13)$$

$$\alpha_i = \frac{(l_1 - n_1 + 1) - (l_2 - n_2 + 1)}{C(n_1, 2) - C(n_2, 2)}, \text{ para una gráfica } G \text{ no planar} \quad (14)$$

Donde

- l_1 es el número de arcos presentes en la gráfica.
- l_2 es el número de arcos presentes en la gráfica cuando se omite el vértice i .
- n_1 es el número de vértices presentes en la gráfica.
- n_2 es el número de vértices presentes en la gráfica original menos el vértice i , es decir $n_2 = n_1 - 1$.
- En el numerador de las ecuaciones 13 y 14 se calcula el número de ciclos independientes en los cuales participa el vértice i .
- $l_1 - n_1 + 1$ es igual al número de ciclos independientes de la gráfica completa.
- $l_2 - n_2 + 1$ es igual al número de ciclos independientes que quedan de eliminar al vértice i de la gráfica.
- En el denominador de cada fórmula se calcula el máximo número de ciclos independientes en los cuales podría participar el vértice i .
- $2n_1 - 5$ es igual al máximo número de ciclos independientes de la gráfica completa, cuando ésta es planar.
- $2n_2 - 5$ es igual al máximo número de ciclos independientes de una gráfica con $n_2 = n_1 - 1$ vértices, cuando ésta es planar.
- $C(n_1, 2)$ (léase las combinaciones de n_1 elementos tomados en pares) es igual al máximo número de ciclos independientes de la gráfica completa, cuando ésta es no planar.
- $C(n_2, 2)$ (léase las combinaciones de n_2 elementos tomados en pares) es igual al máximo número de ciclos independientes de una gráfica con $n_2 = n_1 - 1$ vértices, cuando ésta es no planar [41].

El índice de centralidad por intermediación permite analizar la estructura jerárquica de la red y clasificar los arcos carreteros de acuerdo a la centralidad que presenta con respecto a los caminos más cortos. Lo anterior ha sido considerado en investigaciones para identificar puntos críticos en una red de transporte que presenta interdependencia espacial con otras redes, por ejemplo la red carretera y la red ferroviaria [26]. También se ha considerado en el análisis de modelos de redes con flujos para identificar áreas vulnerables dentro del sistema de infraestructura [27]. Freiria y sus colaboradores no toman en cuenta la longitud de las carreteras para la implementación de este índice en la representación dual, considerando además, la fórmula original propuesta por Freeman [42] que es la siguiente para gráficas no dirigidas:

$$C_i^B = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{j,k=1; j \neq k; k \neq i}^N \frac{n_{jk}(i)}{n_{jk}} \quad (15)$$

donde N es el número total de vértices; n_{jk} es el número total de caminos más cortos presentes entre los vértices j y k ; y $n_{jk}(i)$ es el número total de caminos más cortos presentes entre los vértices j y k , donde participa el vértice i .

El índice de poder de Bonacich combina los conceptos de centralidad y poder, además, su definición se encuentra relacionada con el vector propio del teorema de Perron-Frobenius introducido en el capítulo dos del presente trabajo [37]. Este índice mide la centralidad de arcos carreteros en función del número de arcos vecinos que presenta, a la vez que toma en cuenta el número de vecinos de éstos. La fórmula es la siguiente:

$$BP(\alpha, \beta, A) = \alpha(I - \beta A)^{-1} A \mathbf{1} \quad (16)$$

donde

- $BP(\alpha, \beta, A)$ es el índice de poder de Bonacich;
- α es un escalar para normalizar los resultados y su valor se establece de tal forma que satisfaga la siguiente relación [43]:

$$\sum_i BP_i^2(\alpha, \beta, A) = n \quad (17)$$

- β determina el comportamiento de la función, si se establece $\beta < 0$ entonces mientras menos conexiones presenten los vecinos, más poder tendrá el arco carretero, si $\beta = 0$ es equivalente al índice de grado y si $\beta > 0$ el índice evaluará la centralidad del arco carretero con base en la centralidad de sus vecinos;
- A es la matriz de adyacencia;
- I es la matriz identidad;
- $\mathbf{1}$ es una matriz columna de unos.

El software UCINET establece un valor de $\beta = 0.995/r$ donde r es el valor propio relacionado al vector propio del teorema de Perron-Frobenius y 0.995 es un valor establecido a través de estudios.

El coeficiente de agrupamiento es una medida de probabilidad de que dos arcos vecinos de un arco carretero i , se encuentren también conectados, calculándose de la siguiente forma:

$$C_i = \frac{M_i}{k_i(k_i - 1)/2} \quad (18)$$

donde C_i es el coeficiente de agrupamiento del vértice i ; M_i es el número de pares de vecinos del vértice i que se encuentran conectados; y k_i es el número de vecinos del vértice i . Se decidió hacer $C_i = 0$ si $\frac{k_i(k_i-1)}{2} = 0$ para poder visualizar el índice en el mapa.

Un nodo de articulación es aquel vértice que si es removido, entonces puede generar componentes desconectados en la gráfica. La siguiente fórmula evalúa el valor de corte entre dos componentes de la gráfica:

$$cut(A, B) = \sum_{i \in A, j \in B} w_{ij} \quad (19)$$

donde A y B son dos componentes y w_{ij} es el peso del arco que une al vértice $i \in A$ y al vértice $j \in B$. Este indicador muestra el peso total de separar los componentes, mientras mayor sea su valor, más importante es. El software UCINET retorna un arreglo, cuyos valores son 1 o 0 y significa que el vértice i es o no un nodo de articulación, respectivamente.

El grado del vértice es una medida ampliamente utilizada para analizar las redes de transporte, como se menciona en el capítulo dos. A través del grado de los vértices se puede analizar la propiedad libre de escala en las redes [19, 31].

La fragmentación se define como la proporción de pares de vértices que no se pueden alcanzar entre ellos. Dada una matriz R en la cual cada elemento es $r_{ij} = 1$ si el vértice i puede alcanzar a j , y $r_{ij} = 0$ en otro caso, entonces, la fragmentación es definida como sigue [44]:

$$F = 1 - \frac{2 \sum_i \sum_{j < i} r_{ij}}{n(n-1)} \quad (20)$$

Sin embargo, los resultados obtenidos a través de dicha fórmula son diferentes a los proporcionados por el software UCINET. Además el software carece de bibliografía y fórmulas que expliquen su cálculo. Por lo tanto, en el presente trabajo se hizo uso de la ecuación 20 y para evaluar cada arco se quitó la columna y fila correspondiente de la matriz de adyacencia y se calculó el grado de fragmentación causado.

Por último, se propone agregar a la metodología anterior el uso de la centralidad comparada. Dicha medida es propuesta por De la Peña [36] y como su nombre lo indica, realiza una comparación entre la centralidad espectral y alguna característica a evaluar de los vértices de la gráfica, calculándose como sigue:

$$v(i) = \frac{\frac{u(i)}{p(i)}}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{u(j)}{p(j)}} \quad (21)$$

donde $u(i)$ es la centralidad espectral del vértice i definida en el capítulo anterior; $p(i)$ es la característica del nodo i , por ejemplo, si los vértices evaluados fueran poblaciones se esperaría que aquellas con mayor centralidad presentarían una mayor población al ser puntos importantes. Entonces, la centralidad comparada mide esta relación con respecto a la media de toda la gráfica, índices de $v(i) > 1$ se interpretan como un desarrollo por encima de la media, en el caso de las ciudades se interpretaría como poblaciones que van de acuerdo a su importancia.

La razón de la inclusión de este índice dentro del análisis es que algunos autores consideran necesario tomar en cuenta medidas que consideren la función de los arcos [13], por lo que se propone analizar la relación entre la centralidad de los arcos carreteros y su TDPA para dicho fin. Por lo tanto se plantea la idea de que los tramos carreteros con mayor centralidad en la red deberían presentar niveles importantes de TDPA.

Sea $u(i)$ la centralidad espectral de la carretera i y sea $p(i)$ su respectivo TDPA ponderado y se plantea que si $u(i) > u(j)$ entonces $p(i) > p(j)$. Supongamos que en el caso ideal se tendría que $\frac{u(i)}{p(i)} = \frac{u(j)}{p(j)} = r$, donde r representa la proporción ideal que debería existir entre la importancia de la carretera respecto al tránsito que maneja. Entonces la media de estas relaciones $\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{u(j)}{p(j)} = r$. Así, la centralidad comparada $v(i)$ mide qué tan cerca se encuentran las carreteras del caso ideal, donde ostenten una importancia jerárquica dentro de la red de acuerdo con su nivel de ocupación.

Estos indicadores serán los elegidos para realizar la caracterización de la RNCM; a continuación se describe la selección de la porción de la red para ser analizada.

3.2 Definición de la sub-red considerada

El modelo de la red se encuentra enfocado al ruteo y entre sus catálogos se encuentra la definición de la red vial, la cual entre los atributos que la describen se encuentran: i) identificador de la red vial; ii) tipo de vialidad; iii) nombre de la vialidad; iv) número de vías vehiculares; v) condición; vi) datos para distinguir desniveles; vii) peaje; viii) sentido; ix) jurisdicción; x) velocidad para ruteo; y xi) longitud en metros, entre otros. Otros catálogos que se incluyen son: a) estructuras como puentes y túneles; b) sitios de interés; c) plazas de cobro; d) tarifas; y e) localidades. La red se encuentra dividida en 619,714 líneas con un total de 158,246 km de carreteras.

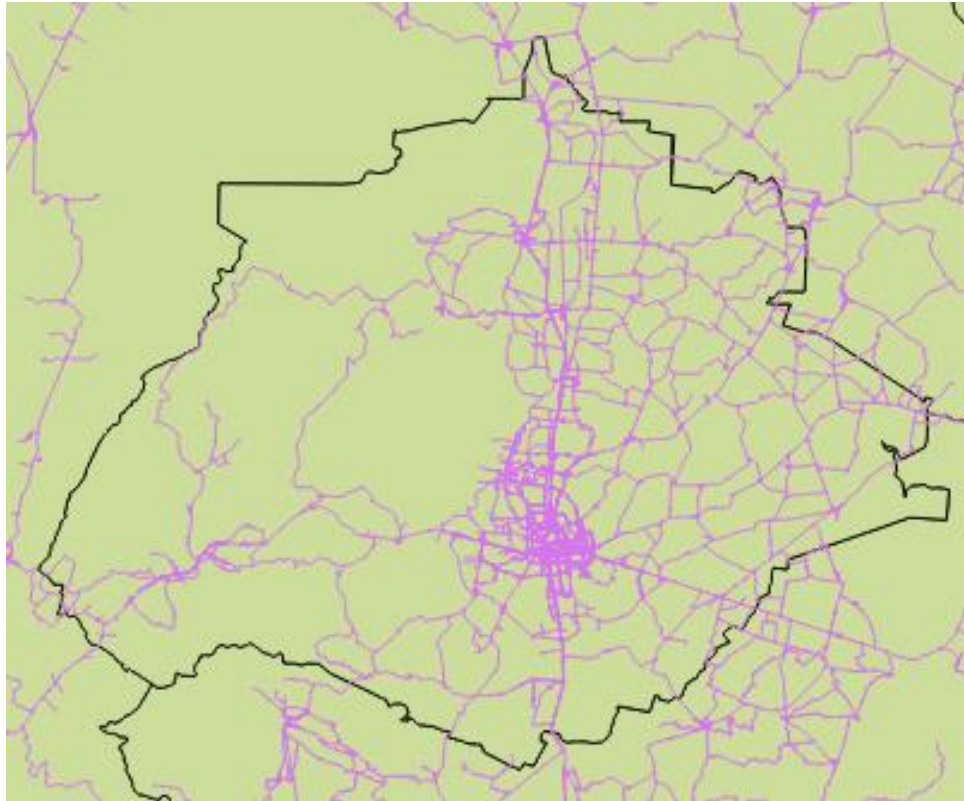
Cabe mencionar que la RNCM puede ser descargada desde la página del INEGI [5] en su versión del 2015 en formato Shapefile, el cual es de tipo propietario y muy

extendido en su uso. También existe la opción de descargarlo desde la página del CKAN [6] en el formato abierto CSV (del inglés comma-separated-values).

Como se mencionó antes, dado que el presente trabajo de investigación se encuentra orientado hacia la exportación dentro del TLCAN, se decidió solo considerar la red formada por aquellas vialidades por donde el autotransporte de carga está autorizado a circular. La DGST determina una serie de tramos carreteros en el Libro de Datos Viales [40] denominados como Red Nacional de Carreteras Pavimentadas (RNCP). La RNCP la cual se tomó en cuenta para el análisis topológico de la red ya que cuenta con las características necesarias para la circulación del autotransporte federal de carga. En consecuencia se definieron en total 1,438 segmentos carreteros, los cuales incluyeron tramos federales y estatales, libres o de cuota. Una desventaja de esta información es que la definición de los segmentos no se encuentra relacionado con el formato del modelo de la RNCM y su integración con ésta resultó complicada.

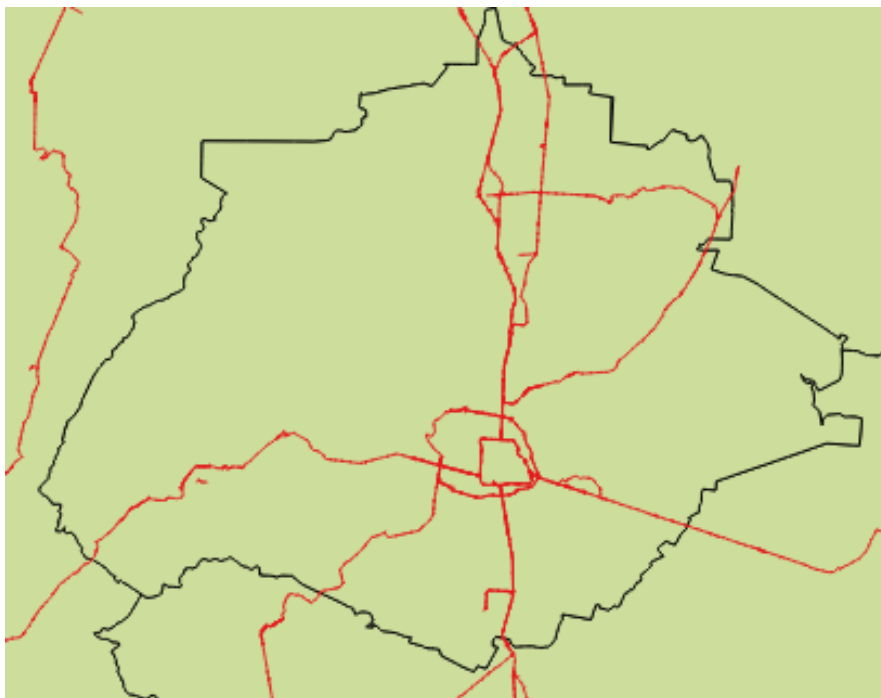
Otra sub-red con estas características y basada en el modelo de la RNCM se definió para el desarrollo del Modelo Nacional de Transporte, descrito en la publicación técnica número 459 del IMT [45]. La sub-red federal de la RNCM que se considera presenta un total de 186,280 líneas, lo cual representa un 30% de las líneas del modelo completo.

Estos trabajos fueron considerados como apoyo para determinar la sub-red a ser analizada, ya que presentan las características deseables para el presente trabajo. A modo de ejemplo, en las siguientes figuras se muestra la red carretera de Aguascalientes en las tres opciones mencionadas, las cuales son: i) la RNCM; ii) la Red del Modelo Nacional de Transporte (RMNT); y iii) la Red Nacional de Carreteras Pavimentadas (RNCP).



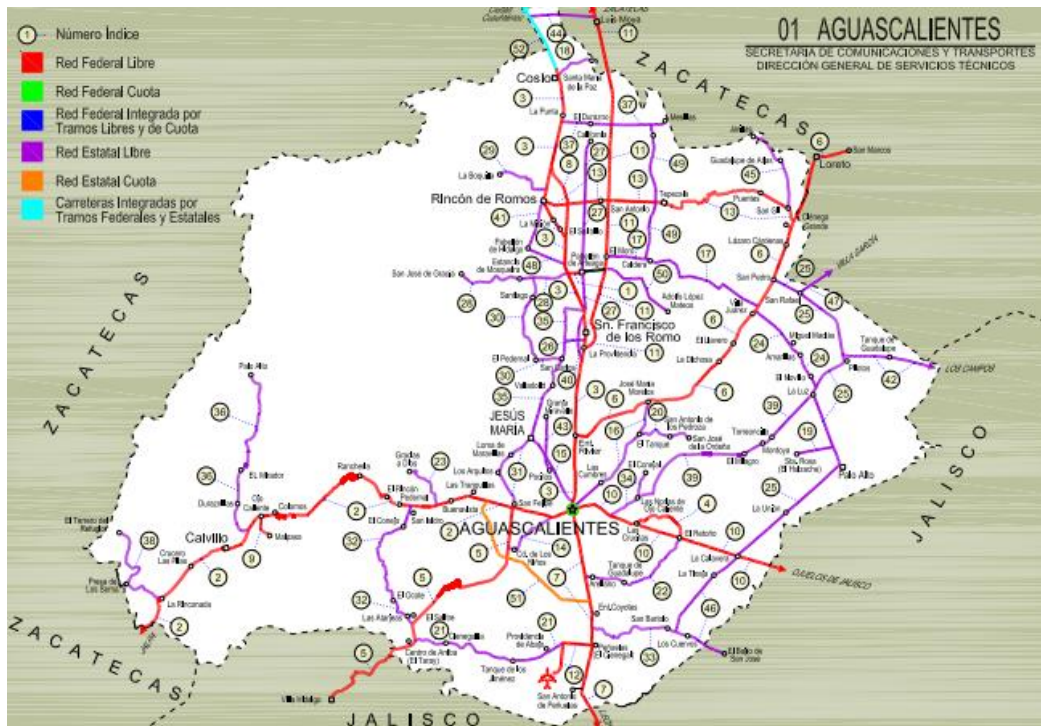
Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI [46].

Figura 3.1. Vialidades de Aguascalientes consideradas en la RNCM



Fuente: Elaboración propia con datos del IMT [45].

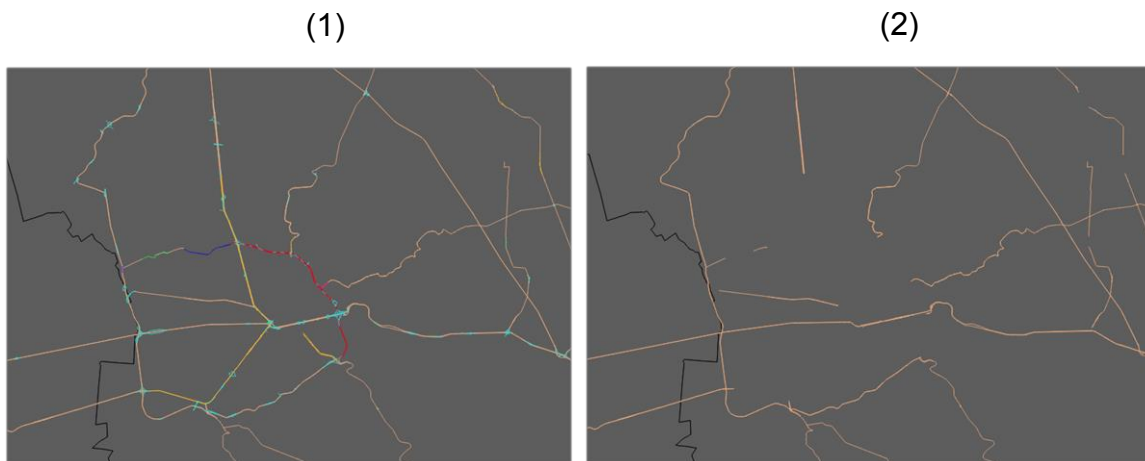
Figura 3.2. Carreteras federales de Aguascalientes consideradas en la RMNT



Fuente: Libro de Datos Viales de la DGST [40].

Figura 3.3. Carreteras federales y estatales de Aguascalientes consideradas en la RNCM

Uno de los principales problemas de trabajar con la RNCM es que la representación de los tramos carreteros no es continua, ya que los tramos cambian de tipo de vialidad y por lo tanto de nombre, código, recubrimiento, etc. Los atributos que describen cada tipo de vialidad son distintos, si una carretera atraviesa una ciudad cambia de tipo carretera a avenida, entonces, el modelo de la RNCM no considera necesario incluir algún dato que permita saber dónde continúa el tramo carretero en cuestión. En la Figura 3.4 se muestra lo que pasaría si se consideran solo vialidades de tipo carretera en la RNCM, el resultado es una red desconectada. Esta manera de modelar la RNCM puede llegar a causar problemas en un futuro, cuando se considere realizar solamente ruteo de autotransporte de carga.



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI.

Figura 3.4. Vialidades de la ciudad de Querétaro. (1) Distintos tipos de vialidades. (2) Carreteras de acuerdo a la RNCM

Problemas como el anterior fueron motivo para plantear un método para conseguir una sub-red de carreteras. A continuación se enlistan los pasos para la definición de la sub-red:

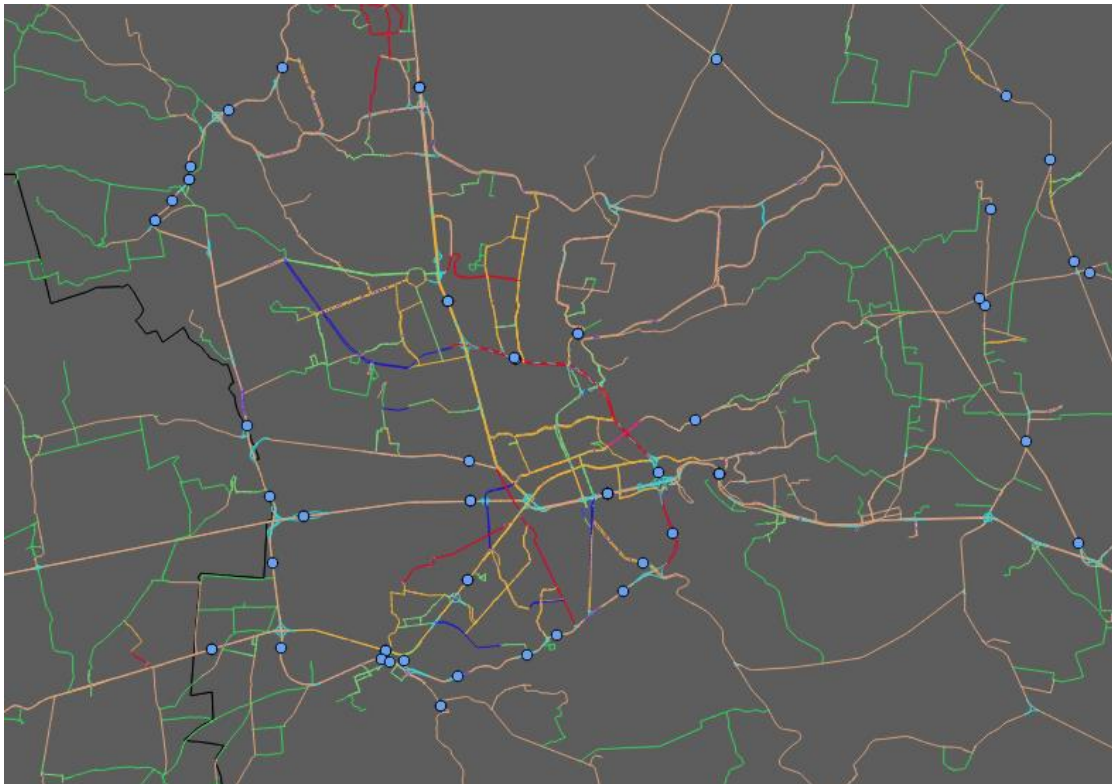
1. **Base de datos de la DGST.** Se creó una base de datos georreferenciada con los datos viales de la DGST, con la finalidad de ser usada como referencia de los tramos carreteros a definir.
2. **Relacionar las redes.** Se creó una solución informática que relaciona la información de la DGST con la RNCM con la finalidad de establecer la sub-red.
3. **Corrección de la red.** Se revisó la sub-red determinada en el paso anterior y se realizaron las correcciones pertinentes con apoyo de la información de la RMNT.

Para la definición de la base de datos de la DGST se consideró la estructura de los datos publicados en dicho informe. Los datos se encuentran divididos por entidad federativa y en cada caso se muestra un mapa índice de las carreteras, como se aprecia en la Figura 3.3. También se enlistan las estaciones de aforo correspondientes a cada carretera y cuentan con los siguientes datos:

- Nombre de la carretera;
- Clave de la carretera;
- Ruta de la carretera;
- Año de los datos;
- Nombre del punto generador;
- El km correspondiente a la ubicación del punto generador;
- Tipo de estación, si el aforo se realizó antes del punto generador, en el punto o después del punto generador. La posición considera el crecimiento como referencia el aumento del kilometraje de la carretera.
- Sentido de circulación;

- Tránsito diario promedio anual;
- La clasificación vehicular en porcentaje;
- Factor para determinar el volumen horario de proyecto;
- Factor direccional;
- Las coordenadas de cada estación.

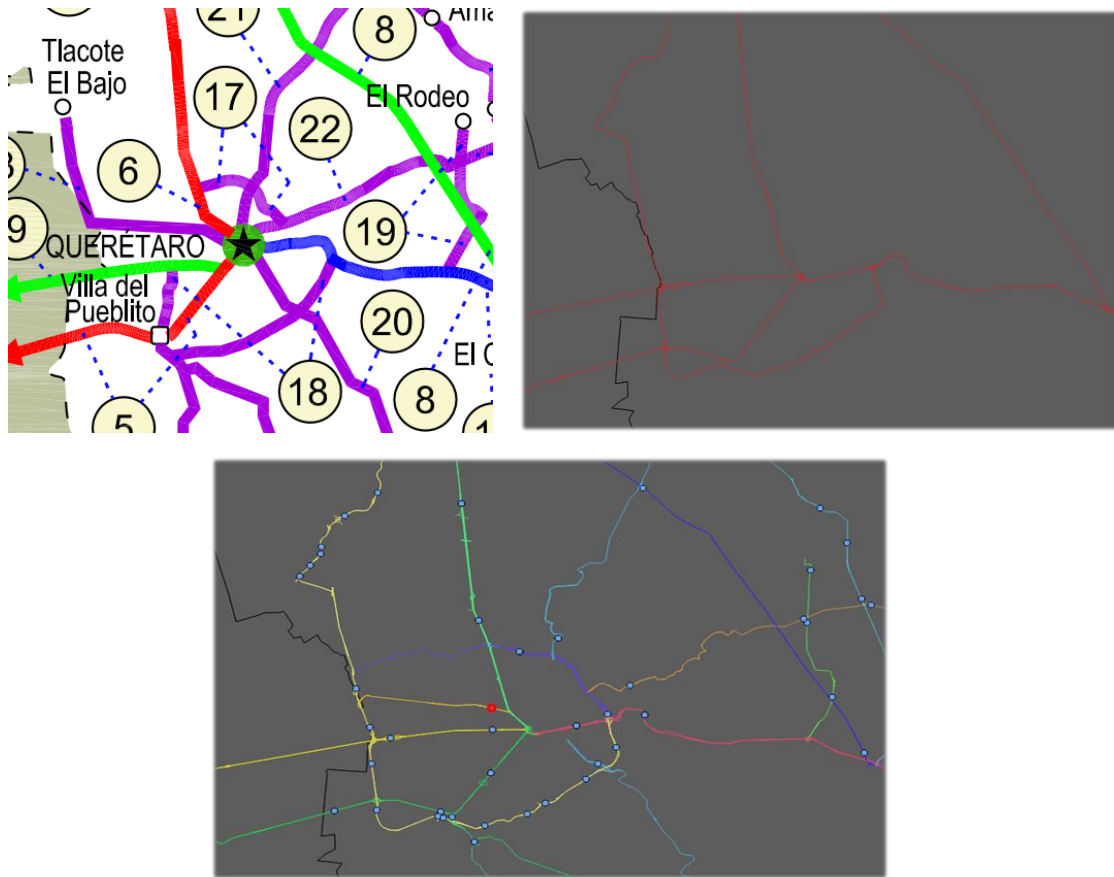
Una vez que se tuvo la base de datos viales se relacionó cada estación con su respectivo tramo carretero de la RNCM. En la Figura 3.5 se muestra un ejemplo gráfico de la relación, donde los puntos azules son las distintas estaciones de aforo consideradas por la DGST. Las vialidades color beige son carreteras y el resto son de otro tipo; por ejemplo las amarillas son avenida y se puede observar que hay estaciones sobre éstas, por lo que dichas avenidas pertenecen a la carretera correspondiente. Cada vialidad de tipo carretera que tuviera relacionada una estación de aforo, se le asignó el identificador numérico correspondiente al tramo carretero de la DGST. El resto de tramos carreteros que comparten el mismo nombre, código, recubrimiento, administración y jurisdicción se relacionaron con el mismo identificador. Sin embargo, para las vialidades de otro tipo esto fue imposible, ya que en su descripción solo incluyen a lo más el nombre y en México existen varias vialidades con el mismo nombre. De este modo, solo los tramos más cercanos a cada estación fueron relacionados con la carretera en cuestión.



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI y la DGST.

Figura 3.5. Vialidades de la ciudad de Querétaro y estaciones de aforo de la DGST

Al término del paso anterior, la sub-red quedó más definida, sin embargo siguió encontrándose desconectada. El siguiente paso fue revisar tramo por tramo definido por la DGST para completarlo. En esta tarea fue necesario ir comparando la sub-red obtenida en el paso anterior con los mapas proporcionados dentro del Libro de Datos Viales y la RMNT. En la Figura 3.6 se muestran los tres mapas, los dos de la parte superior son los que tuvieron la función de guía y en la parte inferior se muestra el resultado final.

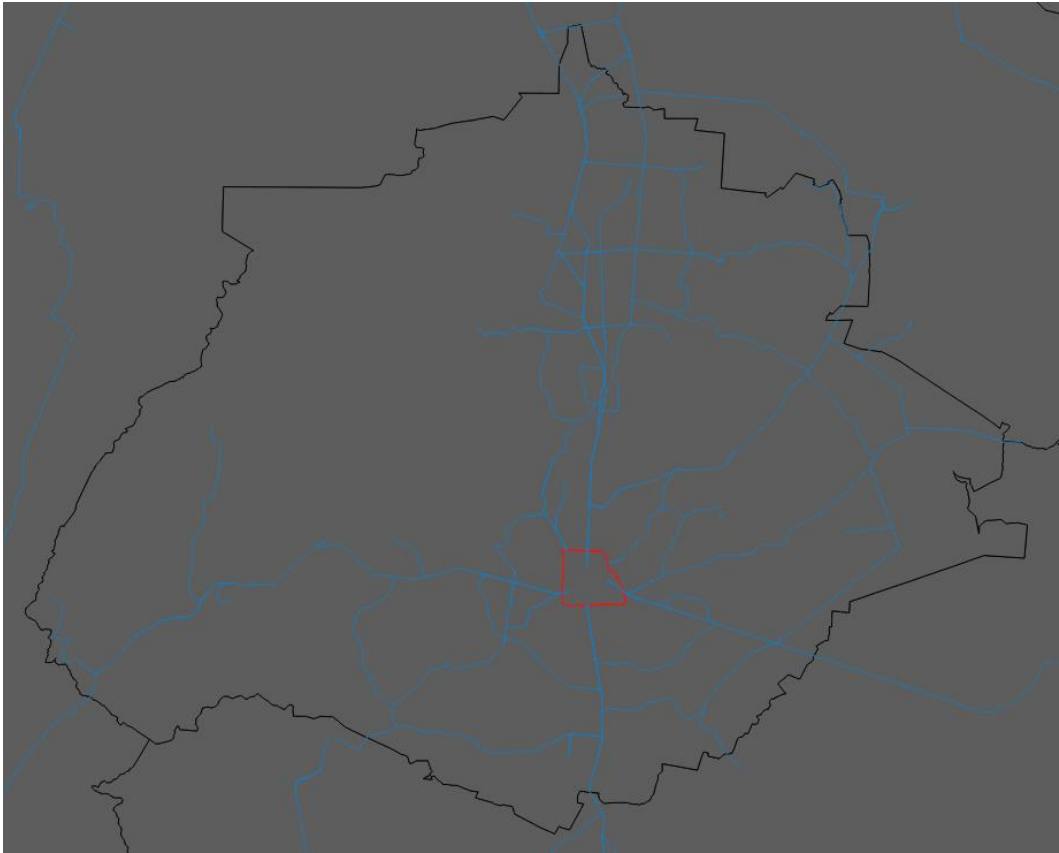


Fuente: Elaboración propia con datos de la DGST, IMT y el INEGI.

Figura 3.6. Vialidades de la ciudad de Querétaro. (Arriba Izq.) Mapa de la DGST. (Arriba Der.) Carreteras de la RMNT. (Abajo Centro) Carreteras consideradas

Como se muestra en la Figura 3.3 y a mayor detalle en el mapa superior izquierdo de la Figura 3.6, la DGST no describe a detalle las intersecciones de las carreteras cuando éstas cruzan capitales. Cuando fue complicado determinar la continuidad de los tramos en estas zonas urbanas, se consideró agregar tramos carreteros que no se incluyen dentro del reporte de la DGST, pero que sí se incluyen en la RMNT. Estos arcos tienen la función de complementar la conectividad entre el resto de las carreteras, sin embargo no serán considerados en el análisis ya que no se cuenta con información de su TDPA. Así, todas las carreteras que intersecten a dichos tramos, son consideradas como que se encuentran conectadas entre sí. En la

Figura 3.7 se muestra un ejemplo de este caso, donde los tramos rojos pertenecen a la RMNT y los azules son los definidos por la DGST.



Fuente: Elaboración propia con datos de la DGST, IMT y el INEGI.

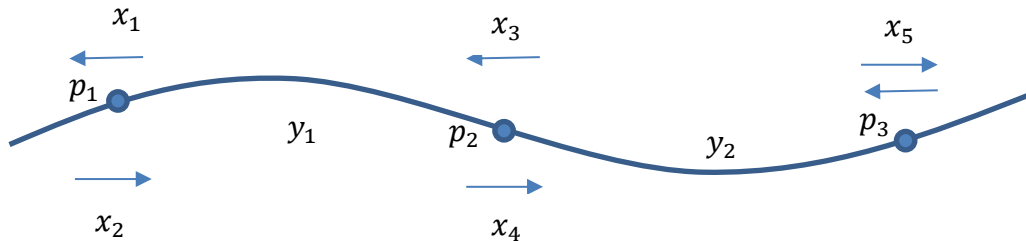
Figura 3.7. Ejemplo de los tramos no considerados por la DGST en Aguascalientes

Como se muestra en el capítulo de resultados, se obtuvo una sub-red formada por tramos estatales y federales, libres o de cuota. Esta sub-red presenta la ventaja de mantener el formato del modelo de la RNCM y además encontrarse relacionada con la información que publica la DGST.

3.3 Asignación del TDPA por tramo carretero

En la sección 3.1 del presente capítulo se comentó el uso del TDPA para evaluar su relación con la centralidad espectral. Como se mencionó en la sección 3.2 el TDPA se puede obtener de los Datos Viales de la DGST, en los que se enlistan una serie de puntos generadores con hasta dos estaciones de aforo cada uno. En la Figura 3.8 se muestra un diagrama de ejemplo de los datos del TDPA, donde los puntos son los puntos generadores, las x_i son el TDPA de la estación correspondiente donde las flechas definen la dirección. Obsérvese que hay estaciones donde el TDPA corresponde a los dos sentidos como es el caso de x_5 .

También se puede observar en el diagrama a las variables y_i , las cuales representan las distancias entre los puntos generadores y son calculadas a través de la diferencia entre los kilómetros de cada punto.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8. Diagrama del TDPA tomado en una carretera

Para el presente trabajo se propone realizar una media ponderada de TDPA para caracterizar cada tramo carretero de la DGST. Continuando con el ejemplo de la Figura 3.8 y suponiendo que los puntos p_1 , p_2 y p_3 determinan un tramo carretero, se define el TDPA ponderado como sigue:

$$p(i) = \frac{\frac{(x_1 + x_2) + (x_3 + x_4)}{2} * y_1 + \frac{(x_3 + x_4) + x_5}{2} * y_2}{y_1 + y_2} \quad (22)$$

Como se muestra en la ecuación 22, la función $p(i)$ es el TDPA ponderado del ejemplo, donde la variable i representa el identificador de la carretera correspondiente. Se propone sumar los TDPA de cada punto generador cuando se encuentran separados de acuerdo al sentido de circulación (obsérvese el caso de x_1 y x_2) esto para tener una medida homogénea en cada punto, ya que existen casos como el de x_5 donde se considera el TDPA de ambos sentidos. También se considera caracterizar cada segmento p_i, p_{i+1} con el promedio del TDPA de los extremos (obsérvese la división entre 2 en la ecuación). El resto de operaciones corresponde a una media ponderada por la distancia de cada segmento.

Cabe resaltar que se desarrolló un algoritmo que calcula el TDPA ponderado de cada tramo carretero y lo agrega a la base de datos de la DGST.

3.4 Variación media de las distancias de viaje por carretera

Como se mencionó al principio del capítulo, derivado de la incertidumbre causada por las negociaciones del TLCAN [47], se decidió reforzar la perspectiva de

exportación dentro del análisis. De este modo, en cuanto a la variación media de las distancias se decidió incluir, además de los puertos fronterizos del norte del país, ciertos puntos importantes en términos de exportación como son: i) puertos marítimos; ii) puertos fronterizos del sur; y iii) aeropuertos. También es importante mencionar que no se tomaron en cuenta todo el conjunto de los puntos de cada tipo, ello por cuestiones de tiempo de cálculo requerido para el análisis, el cual guarda correlación con el número de rutas.

Los puntos de origen de las rutas a calcular fueron las principales zonas metropolitanas en términos de población de acuerdo al Sistema Urbano Nacional 2012 [48]. Documento publicado por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) y la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). En la Tabla 3.1 se muestran las zonas metropolitanas consideradas, las cuales representan el 74.74% con respecto a la población total de todas las zonas. Del área geográfica que conforma a cada zona se calculó el centroide correspondiente, el cual se tomó como punto inicial de referencia de cada ruta.

Tabla 3.1. Zonas Metropolitanas con mayor población, año 2010

Zona Metropolitana	Población (%)
Valle de México	31.51%
Guadalajara	6.95%
Monterrey	6.43%
Puebla-Tlaxcala	4.27%
Toluca	3.03%
Tijuana	2.74%
León	2.52%
Juárez	2.09%
La Laguna	1.90%
Querétaro	1.72%
San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez	1.63%
Mérida	1.52%
Mexicali	1.47%
Aguascalientes	1.46%
Cuernavaca	1.45%
Acapulco	1.35%
Tampico	1.35%
Chihuahua	1.34%
TOTAL	74.74%

Fuente: Elaboración propia con información de CONAPO y SEDESOL [48]

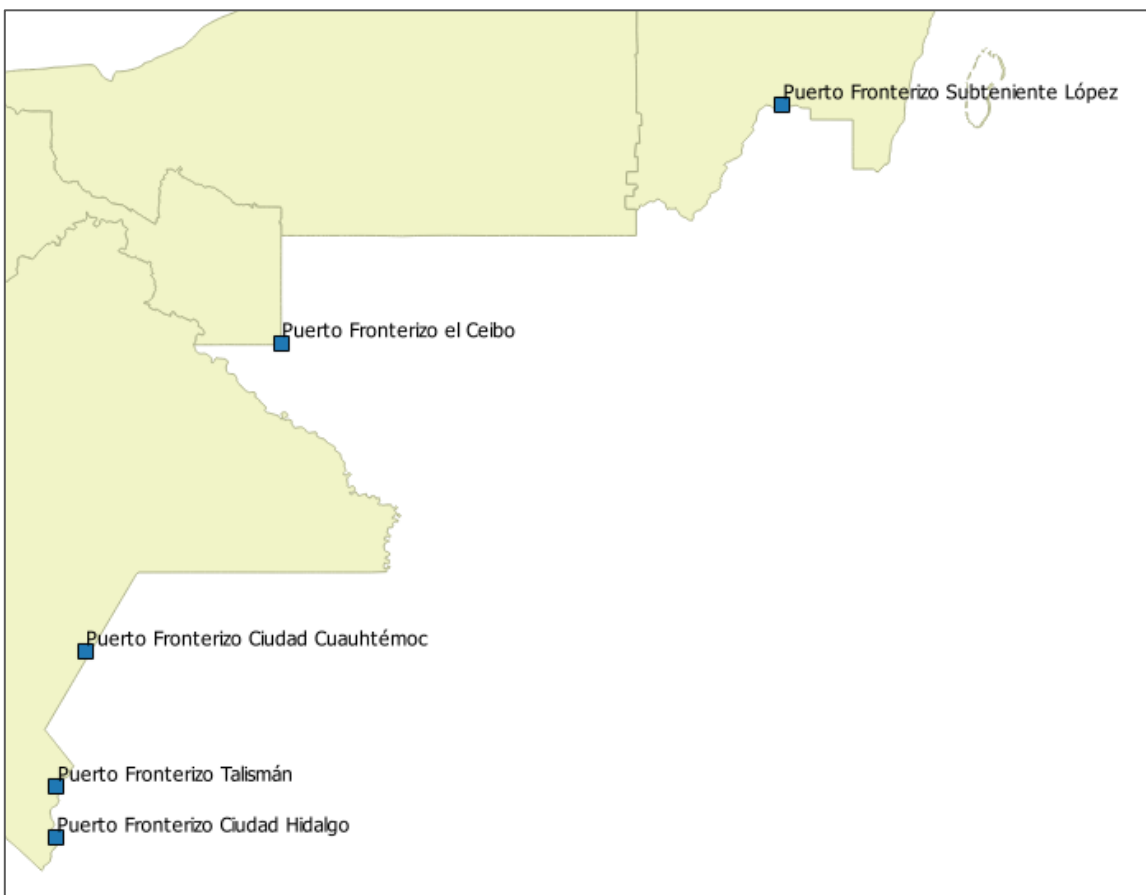
Con respecto a los puertos fronterizos del norte, fueron considerados cuatro como los más importantes. Lo anterior de acuerdo al estudio de puertos de entrada México-Estados Unidos desarrollado por Del Castillo y sus colaboradores [49], los cuales son: i) Tijuana-San Diego (Mesa de Otay); ii) Nogales-Nogales (Mariposa);

iii) Ciudad Juárez-El Paso (Puente Internacional Córdova – Las Américas); y iv) Nuevo Laredo- Laredo (Nuevo Laredo III), (véase la Figura 3.9). Por otro lado, de la frontera sur se consideraron los puertos fronterizos presentes en la RNCM, los cuales son: Subteniente López, el Ceibo, Ciudad Cuauhtémoc, Talismán y Ciudad Hidalgo (véase la Figura 3.10).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.9 Puertos fronterizos considerados del norte de México



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.10. Puertos fronterizos considerados del sur de México

En cuanto a los puertos marítimos de México se incluyeron tres. Los cuales son considerados importantes por la CEPAL en su clasificación de puertos con mayor movimiento de carga en contenedores de América Latina y el Caribe [50], los cuales son: a) Manzanillo; b) Lázaro Cárdenas; y c) Veracruz.

Por último se incluyó el aeropuerto de México, el cual presenta el mayor volumen de carga origen y destino (Estadística operacional de carga en servicio de fletamento internacional del año 2016 [51]). En la Tabla 3.2 se muestran las cargas totales en kilogramos que reciben y que salen de cada uno de los principales aeropuertos en servicio de fletamento internacional.

Tabla 3.2. Estadística operacional origen-destino en servicio de fletamento internacional, 2016

Aeropuerto	Carga origen (kg)	Carga destino (kg)	Carga total (kg)
MEXICO	957,806	2,672,433	3,630,239
LAREDO	1,901,069	643,302	2,544,371
CHIHUAHUA	302,898	1,495,036	1,797,934
DEL BAJIO	153,310	1,382,205	1,535,515
SALTILLO	389,697	1,065,140	1,454,837

Fuente: Elaboración propia con datos de la SCT [51]

Así, se obtuvo un total de 18 zonas metropolitanas como origen y 13 puntos destino entre puertos fronterizos, un aeropuerto y tres puertos nacionales. Estos puntos se usaron como referencia para calcular las distancias de 234 rutas diferentes en total. El proceso del análisis en la variación media de las distancias fue el siguiente:

1. Para cada punto origen se determina la carretera más cercana;
2. Para cada punto destino se determina la carretera más cercana;
3. Se calculan las distancias de las 234 rutas correspondientes a través del algoritmo de Dijkstra aplicado en el modelo de la RNCM, usando las distancias incluidas en el modelo;
4. Por cada tramo carretero, se repiten los pasos 1, 2 y 3 quitando el tramo correspondiente del modelo de la RNCM;
5. Se calculan las variaciones en las distancias a través de la diferencia correspondiente, entre la distancia calculada al estar ausente el tramo carretero y cuando éste se encuentra presente;
6. Se calcula la variación media de las distancias por tramo carretero;
7. Se repiten los pasos 1 al 6 tomando en cuenta tiempos de viaje a la velocidad de diseño de los tramos correspondientes, en lugar de solo la distancia.

Estos resultados serán usados para realizar pruebas de correlación con los índices topológicos de las carreteras. Esto ayudará a determinar la posible relación de los índices topológicos y la robustez de la red carretera nacional.

3.5 Técnica *biclustering* para el agrupamiento de tramos carreteros

Las técnicas de agrupamiento tradicionales solo permiten seleccionar elementos a través de una característica. La técnica de *biclustering* hace a un lado esta limitante, permitiendo agrupar los elementos de un conjunto en distintos grupos [13]. Freiria y sus colaboradores comentan que el uso de esta técnica se extiende en diferentes campos, como es el análisis de datos biológicos, análisis de opiniones de consumidores, minería de datos, análisis de opiniones políticas y riesgo financiero.

La técnica *biclustering* fue desarrollada por Cheng y Church [52]. Su principal objetivo, en términos del análisis de redes carreteras, es identificar subgrupos de carreteras y subgrupos de atributos de las carreteras, a través del agrupamiento simultáneo de los renglones (carreteras) y columnas (atributos) de la matriz que representa la base de datos. Lo anterior, en lugar de considerar por separado las dos dimensiones.

Supongamos que se tienen n carreteras descritas por m indicadores topológicos, es decir, los atributos de la red. Entonces se define una matriz $X \in R^{m \times n}$, donde cada elemento es representado por x_{ij} , $i \in 1 \dots m$ es el índice de la fila y $j \in 1 \dots n$ es el índice de la columna. Se denota a $R = \{1 \dots m\}$ y $C = \{1 \dots n\}$ como el conjunto de filas y columnas, respectivamente, de la matriz X . Si se tienen los subconjuntos $I \subseteq R$ y $J \subseteq C$, entonces se denota a $X(I, J)$ como la submatriz de X que contiene únicamente elementos x_{ij} con índices dentro de los conjuntos I y J .

Para el algoritmo de *biclustering* se necesitan cuatro parámetros libres: i) umbral de ruido ε , que especifica la tolerancia al ruido así como la homogeneidad en los *bicluster* identificados; ii) porcentaje mínimo de filas N_r ; iii) número mínimo de columnas N_c ; iv) porcentaje máximo de superposición en las filas y columnas entre los *bicluster* P_0 .

Mientras más pequeños se definan los valores del umbral de ruido y el mínimo porcentaje de filas y columnas, mayor podrá ser la homogeneidad del *bicluster*.

La calidad del *bicluster* es medida usando principalmente dos criterios: i) puntuación residual del cuadrado medio (MSRS, Mean Square Residue Score); ii) medida de la correlación media (ACV, Average Correlation Measure).

El MSRS se encuentra definido por la siguiente expresión:

$$MSRS = \frac{1}{nm} \sum_{i \in R; j \in C} (x_{ij} - x_{iC} - x_{Rj} + x_{RC})^2 \quad (23)$$

donde $x_{iC} = \frac{1}{m} \sum_{j \in C} x_{ij}$, $x_{Rj} = \frac{1}{n} \sum_{i \in R} x_{ij}$ y $x_{RC} = \frac{1}{mn} \sum_{i \in R, j \in C} x_{ij}$ denotan un agrupamiento de columnas, un agrupamiento de filas y un agrupamiento de filas y

columnas, respectivamente. Un bicluster valido puede ser determinado si $MSRS < \varepsilon$.

La ACV se encuentra definida por la siguiente expresión:

$$ACV = \max \left\{ \frac{\sum_{i,j \in R} |CorR_{ij}| - m}{n^2 - n}, \frac{\sum_{k,l \in C} |CorC_{kl}| - n}{m^2 - m} \right\} \quad (24)$$

donde $CorR_{ij}$ y $CorC_{kl}$ son, respectivamente, los coeficientes de correlación entre las filas i y j , y columnas k y l .

El problema de bicluster se puede formular de la siguiente forma: Dada la matriz de datos X con m filas y n columnas, se puede encontrar un conjunto de bicluster $B_r = (I_r, J_r)$ con $r = 1 \dots t$ donde cada bicluster B_r satisface alguna condición de homogeneidad.

Un bicluster con un nivel alto de homogeneidad en los atributos debe presentar un MSRS bajo y un ACV alto. Freira y sus colaboradores proponen los valores que se muestran en la Tabla 3.3 para los cuatro parámetros libres y son los que se tomaron en cuenta inicialmente en la presente investigación. También se realizaron pruebas con los índices normalizados entre 0 y 1 a través del siguiente método:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (25)$$

Además, se consideraron valores 0.5 y 0.1 para el umbral de ruido ε . Estas consideraciones se toman en cuenta dado que índices como el alfa o la fragmentación varían entre 0 y 1, mientras que otros índices como el grado, varían entre cero e infinito.

Tabla 3.3 Opciones de los parámetros para las pruebas

Parámetros	Opciones
Umbral de ruido	5; 4; 3; 2; 1.5; 1; 0.5
Número mínimo de columnas	6; 5; 4; 3
Porcentaje mínimo de filas	15; 10; 5; 4
Porcentaje máximo de superposición del bicluster	25; 20; 10

Fuente: Freiria et al. [13]

El proceso de evaluación de escenarios se realizó como se describe a continuación:

1. Se realizan pruebas de correlación entre la variación media de las distancias y tiempos de viaje y los valores de los índices topológicos, sin estar agrupados;
2. Se realizan las pruebas con todos los valores de los parámetros libres propuestos, tanto con los datos normalizados como en bruto. En cada caso

- se determina el mejor bicluster de acuerdo a los principios de homogeneidad antes mencionados;
3. Se realizan pruebas de correlación entre la variación media de las distancias y tiempos de viaje, y los valores de los índices topológicos de cada bicluster determinado en el paso 2;
 4. Se analizan los resultados de cada prueba.

Los biclusters más importantes fueron los que presentaron el mayor valor medio relativo a los atributos identificados como más importantes en las pruebas antes mencionadas.

3.6 Programas informáticos considerados

Se identificaron los programas informáticos que se han usado en los distintos trabajos de investigación consultados. A continuación se compararon las características de los programas, así como las limitaciones técnicas para su uso.

En la Tabla 3.4 se presenta un resumen de algunos programas identificados en la literatura. En ella se especifica la página web desde donde se puede descargar o consultar información para su adquisición, el tipo de licencia, plataformas soportadas (sistemas operativos), además de establecer si es posible programar procesos adicionales para aumentar su funcionalidad y adaptarlos a las necesidades del análisis que se decida realizar.

El primer programa que aparece en la Tabla 3.4 es **Pajek**, el cual se distribuye con una licencia de tipo abierta sin fines comerciales. Puede ser instalado en plataformas Microsoft Windows y permite grabar secuencias de comandos primitivos de la misma aplicación. Es un programa para realizar análisis y visualización de redes sociales que puede manejar hasta 9,999,997 vértices. Dentro de la literatura se utilizó para generar los valores de centralidad por intermediación de la red carretera y ferroviaria de Florida [26]. Al ser un programa enfocado a redes sociales, no cuenta con una interfaz para visualizar los datos espaciales de la RNCM, además por lo que se interpreta de su documentación, la programación de procesos adicionales se encuentra sujeto a los comandos de que dispone.

Para su investigación, Freiria et al. [13] se auxiliaron de las herramientas informáticas **Bivisu** (MATLAB), **Ucinet** y **ArcGis**. Como se puede observar en la Tabla 3.4, Bivisu es una herramienta de software de código abierto, sin embargo depende de MATLAB el cual es propietario así como de las plataformas con las que es compatible, las cuales son Microsoft Windows, Linux y Mac OSX. Bivisu es una herramienta para la detección y visualización de *biclustering*, técnica cuyo objetivo es dividir un conjunto muestra tomando en cuenta subconjuntos de atributos de los elementos y es utilizada para encontrar patrones en la red carretera de Coimbra, Portugal. Ucinet es un programa informático propietario para el análisis de redes sociales y se encuentra disponible para plataformas Microsoft Windows. Fue utilizado para el cálculo de los indicadores de centralidad, cohesión y densidad de

la red, no cuenta con la opción de programar procesos adicionales para aumentar su funcionalidad y tampoco se puede visualizar la red espacial.

Tabla 3.4 Resumen de programas informáticos identificados

Programa informático	Página web	Licencia	Plataforma	Programar procesos adicionales
Pajek	http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/pajek/	Libre	Microsoft Windows 95, 98, 2000, NT, XP o superior	Se pueden grabar secuencias de comandos primitivos de Pajek en un archivo
MATLAB	http://www.mathworks.com/products/matlab/	Propietaria	Microsoft Windows, Mac OSX y Linux	Cuenta con su propio lenguaje de alto nivel
Ucinet	https://sites.google.com/site/ucinetsoftware/home	Propietaria	Microsoft Windows 95, 98, NT	N/A
Bivisu	http://www.eie.polyu.edu.hk/~nflaw/Biclustering/	Código abierto	Microsoft Windows, Mac OSX y Linux (Desarrollado en MatLab)	Es un programa desarrollado en MatLab por lo que puede complementar un estudio en dicha plataforma.
ArcGis	http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop	Propietaria	Microsoft Windows y Linux	Cuenta con una API para desarrollar aplicaciones en COM, .NET, Java y C++
TransCAD (Development Kit)	http://www.caliper.com/transcad/development.htm	Propietaria	Microsoft Windows 10, 8 (incluyendo 8.1), 7, XP Professional y Vista	A través de GISDK (Geographic Information System Developer's Kit) se pueden extender las funciones de TransCAD
JUMP Unified Mapping Platform	http://www.vividolutions.com/jump/	Código abierto	Microsoft Windows	Se pueden agregar algoritmos
JTS Topology Suite	http://www.vividolutions.com/jts/JTSHome.htm	Código abierto	Microsoft Windows	N/A

ArcGis, como su nombre lo dice, es un sistema de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) para trabajar con mapas y su información correspondiente. Es un programa informático de licencia propietaria disponible para las plataformas Microsoft Windows y Linux, y cuenta con una interfaz de programación de aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) en lenguajes COM, .NET, Java y C++. En diferentes trabajos se ha utilizado para construir y visualizar las redes carreteras [18] [11].

Novak y Sullivan [10] hacen uso del programa **TransCAD** para implementar su índice de accesibilidad por cercanía crítica. TransCAD es un programa para la planeación del transporte, de licencia propietaria y disponible para plataformas

Microsoft Windows. Además, cuenta con Geographic Information System Developer's Kit (GISDK) para extender sus funciones.

Por su parte, Zhang [24] uso el programa **JUMP** Unified Mapping Platform en su investigación. JUMP es un programa para realizar el procesamiento de datos espaciales, el cual cuenta con una interfaz gráfica de usuario y un API (JTS Topology Suite). Se encuentra desarrollado en Java, es de código abierto y está disponible para plataformas Microsoft Windows. Fue utilizado para la implementación del algoritmo de generalización de la red en su caso de estudio.

En el presente trabajo se propone el desarrollo de una herramienta de análisis de la RNCM, por lo que ésta fue desarrollada en lenguaje Java y su funcionamiento fue validado comparando resultados con las herramientas antes mencionadas, como el software UCINET. Para el procesamiento del modelo de la RNCM, ésta fue exportada a un formato de base de datos Postgresql. El software Postgresql es un sistema de administración de bases de datos relacionales de código abierto [53] y cuenta con una extensión llamada Postgis la cual permite trabajar con datos georreferenciados.

Las ventajas de la solución de software desarrollada con respecto a las anteriores son:

- Puede tomar como datos de entrada el modelo de la RNCM y realiza los cambios y tratamiento de la información necesarios para su análisis;
- Crea la matriz de adyacencia de la RNCM;
- Calcula los índices propuestos para la RNCM;
- Permite exportar los índices calculados a un archivo en formato CSV para su uso y análisis en otros programas informáticos, como Excel o Minitab;
- Alimenta la base de datos de la RNCM con los índices calculados.

El código fue desarrollado en lenguaje Java (JDK 7) y para la manipulación del modelo de la RNCM se hizo uso de la biblioteca Postgis-JDBC en su versión 2.2.1 y Postgresql-JDBC en su versión 42.1.4. Para el cálculo de los índices se hizo uso de las bibliotecas JGrapt en su versión 1.0.1 y UJMP en su versión 0.3.0. Para la visualización de la red se usó QGIS Desktop en su versión 2.14.3. También se hizo uso del código del programa Bivisu para la identificación y visualización de biclustering. El software usado es de código abierto. Para realizar los análisis estadísticos se recurrió al programa Minitab 16.

3.7 Conclusiones

En este capítulo se describió la metodología usada, iniciando con la descripción de los ocho índices considerados. A través de estos índices se llegó a conocer características importantes que presenta la red carretera, como son: i) el grado de caminos alternos presentes en la red; ii) la centralidad que presenta cada tramo con respecto a los caminos más cortos; iii) la centralidad del arco carretero con base en

la centralidad de sus vecinos; iv) las carreteras que si son removidas pueden llegar a generar desconexiones y su grado de afectación; entre otras.

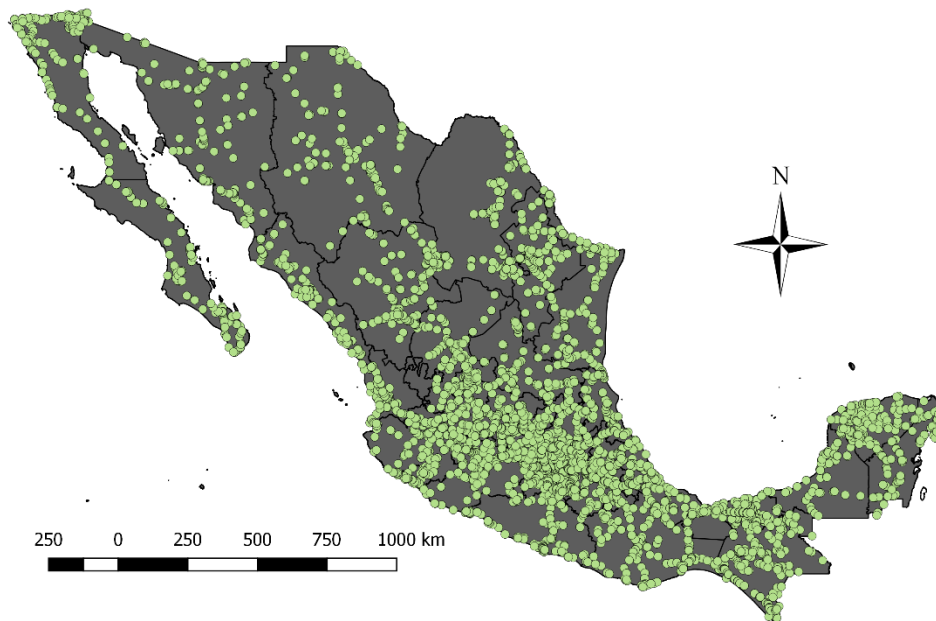
También se incluyó una descripción de la definición de la sub-red considerada tomando en cuenta tres fuentes de información: i) la Red Nacional de Caminos de México; ii) la Red Nacional de Carreteras Pavimentadas de la Dirección General de Servicios Técnicos; y iii) la sub-red considerada por el Modelo Nacional de Transporte del Instituto Mexicano de Transporte. A través de estas fuentes de información se pudo definir una sub-red que considera carreteras aptas para el tránsito del transporte federal de carga y así enfocar el estudio en ellas, las cuales son de suma importancia logística para el país.

De igual forma, se abordó la descripción de la asignación del TDPA por tramo carretero, la estimación de la variación media de las distancias y tiempos de viaje por carretera, la técnica biclustering para el agrupamiento de tramos carreteros y las herramientas informáticas consideradas para desarrollar el análisis. A través de todos estos pasos se logró obtener los resultados que se exponen en el siguiente capítulo.

4 Resultados

4.1 Base de datos de la DGST

Con la información de la DGST se creó una base de datos, con la finalidad de contar con un formato práctico de ésta para su implementación. La base de datos se encuentra formada por 5 tablas en total: Estados, Tipo de red, Carreteras, Lugares y TDPA. La tabla “Estados” tiene la finalidad de unificar los nombres y abreviaturas usadas por cada fuente de información (INEGI, RNCM, DGST) para hacer referencia a los estados de la República Mexicana, dado que no existe un consenso en cuanto a éstos en cada uno de los proyectos. Dentro del reporte se clasifican los tramos carreteros en seis distintos tipos, de acuerdo a su jurisdicción y costo (tramo de cuota o libre). Así, la tabla titulada “Tipo de red” incluye dicha información. En la tabla “Carreteras” se definen los 1,438 tramos establecidos por la DGST, además se incluye la ruta, tipo de red a la que pertenece, estado en el que se localiza, su longitud y TDPA ponderado. En la tabla “Lugares” se definen las ubicaciones de los puntos generadores (9,861 estaciones en total), en la cual se establece la carretera a la que pertenece, su nombre, el kilómetro de la carretera en el cual se ubica, así como su ubicación georreferenciada. Por último, la tabla TDPA incluye, como su nombre lo indica, el estadístico correspondiente al tránsito diario promedio anual de cada estación de aforo (TDPA). Entre los datos que incluye se tiene el año del registro y el porcentaje correspondiente por tipo de configuración vehicular. A continuación en la Figura 4.1 se muestra su representación geográfica así como la descripción detallada de las tablas mencionadas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.1. Estaciones de aforo del Libro de Datos Viales de la DGST.

Tabla 4.1. Tabla Estados

ID	Nombre INEGI	Nombre DGST	Abrev. INEGI	Abrev. RNCM	Abrev. DGST
1	Aguascalientes	AGUASCALIENTES	Ags.	Ags.	AGS
2	Baja California	BAJA CALIFORNIA	BC	B.C.	BC
3	Baja California Sur	BAJA CALIFORNIA SUR	BCS	B.C.S.	BCS
4	Campeche	CAMPECHE	Camp.	Camp.	CAM
5	Coahuila de Zaragoza	COAHUILA	Coah.	Coah.	COA
6	Colima	COLIMA	Col.	Col.	COL
7	Chiapas	CHIAPAS	Chis.	Chis.	CHIS
8	Chihuahua	CHIHUAHUA	Chih.	Chih.	CHIH
9	Ciudad de México	DISTRITO FEDERAL	CDMX	D.F.	DF
10	Durango	DURANGO	Dgo.	Dgo.	DGO
11	Guanajuato	GUANAJUATO	Gto.	Gto.	GTO
12	Guerrero	GUERRERO	Gro.	Gro.	GRO
13	Hidalgo	HIDALGO	Hgo.	Hgo.	HGO
14	Jalisco	JALISCO	Jal.	Jal.	JAL
15	México	MEXICO	Mex.	Mex.	EM
16	Michoacán de Ocampo	MICHOACAN	Mich.	Mich.	MICH
17	Morelos	MORELOS	Mor.	Mor.	MOR
18	Nayarit	NAYARIT	Nay.	Nay.	NAY
19	Nuevo León	NUEVO LEON	NL	N.L.	NL
20	Oaxaca	OAXACA	Oax.	Oax.	OAX
21	Puebla	PUEBLA	Pue.	Pue.	PUE
22	Querétaro	QUERETARO	Qro.	Qro.	QRO
23	Quintana Roo	QUINTANA ROO	Q. Roo	Q. Roo	QR
24	San Luis Potosí	SAN LUIS POTOSI	SLP	S.L.P.	SLP
25	Sinaloa	SINALOA	Sin.	Sin.	SIN
26	Sonora	SONORA	Son.	Son.	SON
27	Tabasco	TABASCO	Tab.	Tab.	TAB
28	Tamaulipas	TAMAULIPAS	Tamps.	Tamps.	TAM
29	Tlaxcala	TLAXCALA	Tlax.	Tlax.	TLAX
30	Veracruz de Ignacio de la Llave	VERACRUZ	Ver.	Ver.	VER
31	Yucatán	YUCATAN	Yuc.	Yuc.	YUC
32	Zacatecas	ZACATECAS	Zac.	Zac.	ZAC

Tabla 4.2. Tabla Tipo de red

ID	Nombre
1	RED FEDERAL LIBRE
2	RED FEDERAL DE CUOTA
3	RED ESTATAL LIBRE
4	RED ESTATAL DE CUOTA
5	RED FEDERAL INTEGRADA POR TRAMOS LIBRES Y DE CUOTA
6	CARRETERAS INTEGRADAS POR TRAMOS FEDERALES Y ESTATALES

Tabla 4.3. Descripción de la tabla Carreteras

Encabezado	Descripción
ID	Identificador del registro en esta tabla.
ID_EDO	Identificador del estado al que pertenece el tramo carretero
ID_DGST	Identificador relacionado con los registros del informe de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST)
Nombre	Nombre del tramo carretero
Clave	Clave definida en el reporte de la DGST
Ruta	Formado por la abreviatura del nombre de la entidad federativa que ejerce autoridad jurídica sobre la carretera y el número oficial asignado a la carretera.
ID_TIPO_RED	Identificador del tipo de red a la que pertenece el tramo, se define en el catálogo TIPO_RED
Longitud	Longitud reportada dentro de los datos de Estadística de Accidentes de Tránsito por la DGST.
TDPA_weighted	TDPA ponderado del tramo en cuestión.

Tabla 4.4. Descripción de la tabla Lugares

Encabezado	Descripción
ID	Identificador del registro en esta tabla.
ID_Carretera	Identificador de la carretera a la que pertenece este tramo
Nombre	Contiene los nombres de los puntos generadores, como son ciudades, poblaciones y entronques.
Km	Kilómetro del punto generador antes referido.
Latitud	Se presentan las coordenadas geográficas del sitio de ubicación del equipo de aforo automático.
Longitud	

Tabla 4.5. Descripción de la tabla TDPA

Encabezado	Descripción
ID	Identificador del registro en esta tabla.
ID_Lugar	Identificador del lugar de referencia de la estación de aforo
Año	Año correspondiente de los registros.
TE	Tipo de Estación. Considerando el sentido en que crece el kilometraje de la carretera, el número "1" indica que el aforo fue efectuado antes del punto generador, el "2" que fue realizado en el punto generador y el "3" que el aforo se llevó a cabo después del punto generador.
SC	Sentido de Circulación. El número "1" indica que los datos corresponden al sentido de circulación en que crece el cadenamiento del camino, el "2" al sentido en que decrece el kilometraje y el "0" a ambos sentidos.
TDPA	Es el tránsito diario promedio anual 2015 registrado en el punto generador.
CV_M	CLASIFICACION VEHICULAR. Se refiere a los tipos de vehículos que integran al tránsito, ésta se proporciona en por ciento del TDPA, de acuerdo a la siguiente
CV_A	

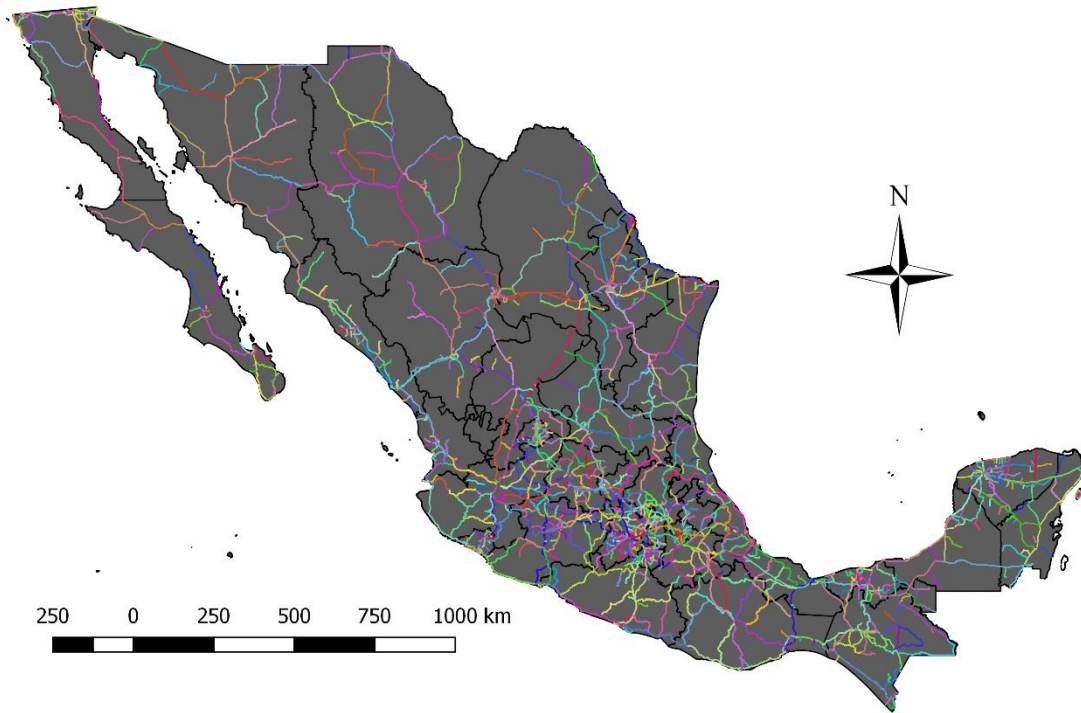
CV_B	simbología: Motos (M), Automóviles (A), Autobuses (B), Camiones Unitarios de 2 ejes (C2), Camiones Unitarios de 3 ejes (C3), Tractor de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes (T3S2), Tractor de 3 ejes con semirremolque de 3 ejes (T3S3), Tractor de 3 ejes con semirremolque de 2 ejes y remolque de 4 ejes (T3S2R4) y Considera otro tipo de combinaciones de camiones de carga (Otros).
CV_C2	
CV_C3	
CV_T3S2	
CV_T3S3	
CV_T3S2R4	
CV_OTROS	
A_TOTAL	Suma de las clasificaciones M y A
B_TOTAL	Igual al valor de la clasificación B
C_TOTAL	Suma de las clasificaciones C2, C3, T3S2, T3S3, T3S2R4 Y OTROS
FACTOR_K	Este factor es útil para determinar el volumen horario de proyecto, el dato que se proporciona es aproximado y se obtuvo a partir de relacionar los volúmenes horarios más altos registrados en la muestra de aforo semanal y el tránsito diario promedio anual.
FACTOR_D	Factor Direccional. Este factor se obtuvo de dividir el volumen de tránsito horario en el sentido de circulación más cargado entre el volumen en ambos sentidos a la misma hora.

4.2 Red considerada para el análisis

Del proceso propuesto en el capítulo anterior, se obtuvo como resultado una red formada por 203,393 líneas de la RNCM original. Se prosiguió a agrupar estas líneas en las 1,217 carreteras distintas definidas por la DGST. Al término del proceso se agruparon en solo 1,206 carreteras, dado que 11 de ellas no fue posible determinar, por no coincidir los datos entre las dos fuentes de información (RNCM y los Datos Viales).

La base de datos de la red mantiene las columnas de datos originales de la RNCM y además se agregó una tabla llamada "indicadores" que cuenta con 10 columnas para almacenar el identificador de carretera de acuerdo a la DGST y los resultados de los nueve índices, calculados a nivel nacional.

A continuación en la Figura 4.2 se muestra la red considerada en su representación geográfica, así como una descripción en la Tabla 4.6 de las columnas agregadas al modelo de la RNCM para almacenar los resultados del análisis.



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, IMT y DGST.

Figura 4.2 Red considerada para el análisis

Tabla 4.6. Descripción de la tabla “indicadores”

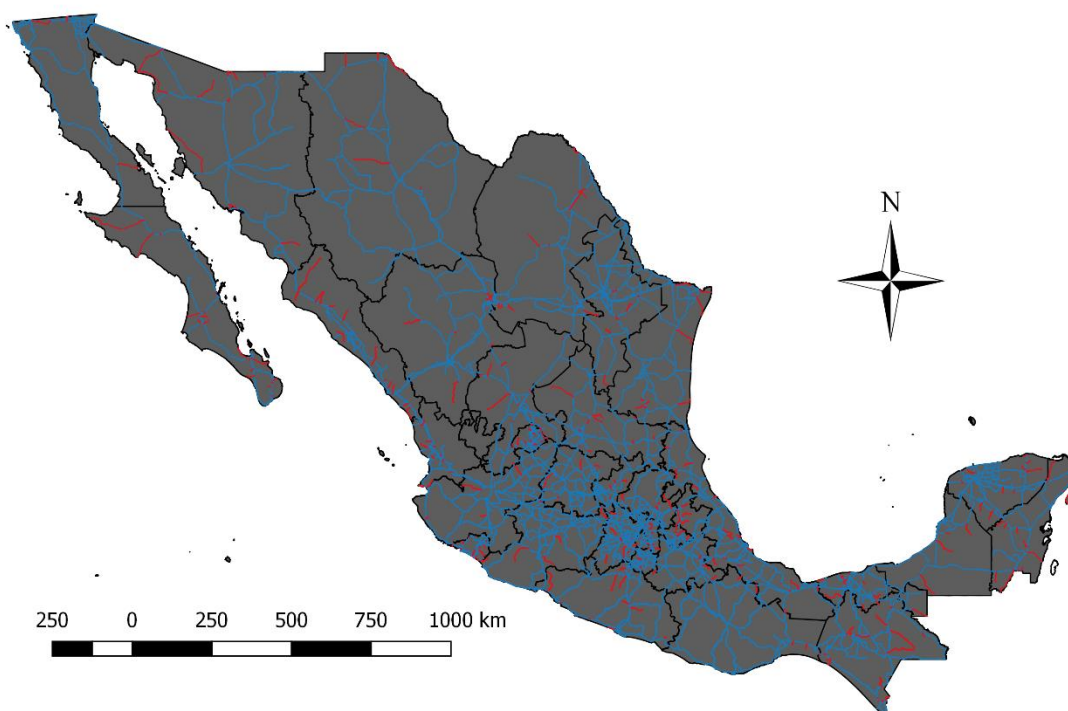
Encabezado	Descripción
id_carretera	Identificador de la carretera correspondiente, de acuerdo a la información de la DGST.
alfa_N	Valor del índice alfa de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.
intermediacion_N	Valor del índice de centralidad por intermediación de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.
poder_N	Valor de la centralidad de poder de Bonacich de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.
agrupamiento_N	Valor del coeficiente de agrupamiento de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.
puntos_corte_N	Valor del índice de nodos de articulación de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.
grado_N	Valor del grado de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.
fragmentacion_N	Valor de fragmentación de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.
espectral_N	Valor de la centralidad espectral de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.
cent_comparada_N	Valor de la centralidad comparada de la carretera correspondiente, evaluada a nivel nacional.

4.3 Indicadores de la RNCM

A continuación se muestran algunas estadísticas relacionadas con los indicadores contemplados en el presente trabajo. Para la gráfica dual de la red hay en total 1,206 nodos (ya que son 1,206 carreteras) y es una gráfica conexa, es decir, existe un camino entre todo par de nodos. Además, esta red dual es una gráfica no planar, es decir, se puede dar el caso de que dos arcos de la gráfica dual se crucen sin que haya nodo de intersección (aquí hay que hacer notar que se habla de los arcos de la gráfica dual, no de los arcos carreteros de la red), por lo que es hay que considerar aquellas fórmulas destinadas a este tipo de gráficas.

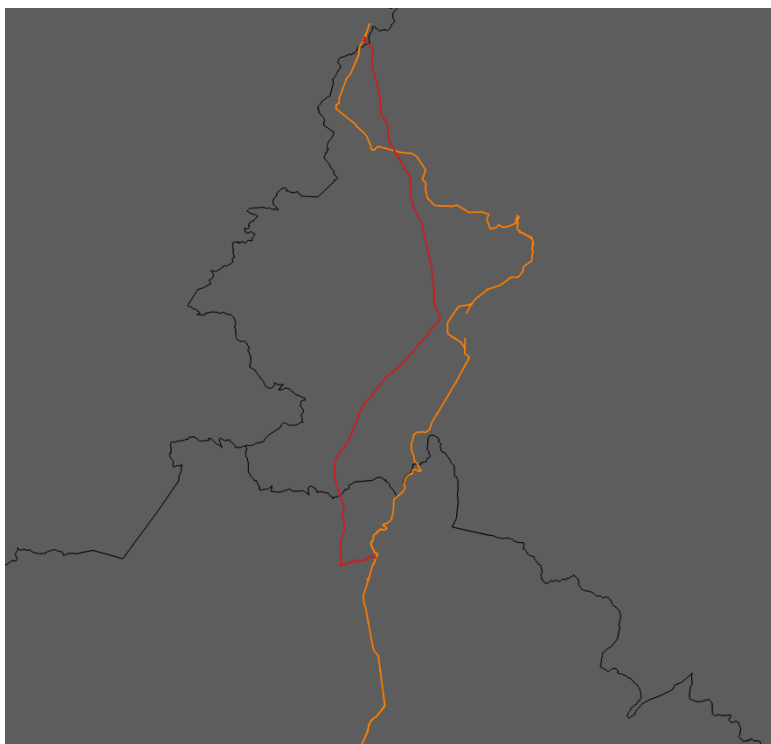
4.3.1 Índice alfa

El índice alfa propuesto compara el número de ciclos en los que participa una carretera con respecto al total de ciclos en los que puede llegar a participar y varía entre 0 y 1. Entonces, mientras mayor sea el índice alfa de una carretera, mayor será su nivel de redundancia, por lo que es necesario poner especial atención a los tramos carreteros con valores cercanos a cero. En la Figura 4.3 se muestran en color rojo las carreteras con un índice alfa igual a cero, sumando un total 275 carreteras el cual representa 22.84% de los tramos carreteros considerados y son de tipo ramal y accesos a poblaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.3. Carreteras que presentan un índice alfa igual a cero



Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI, IMT y DGST.

Figura 4.4. Carretera Apizaco-Tejocotal (naranja) y Tlaxco-Tejocotal cuota (rojo)

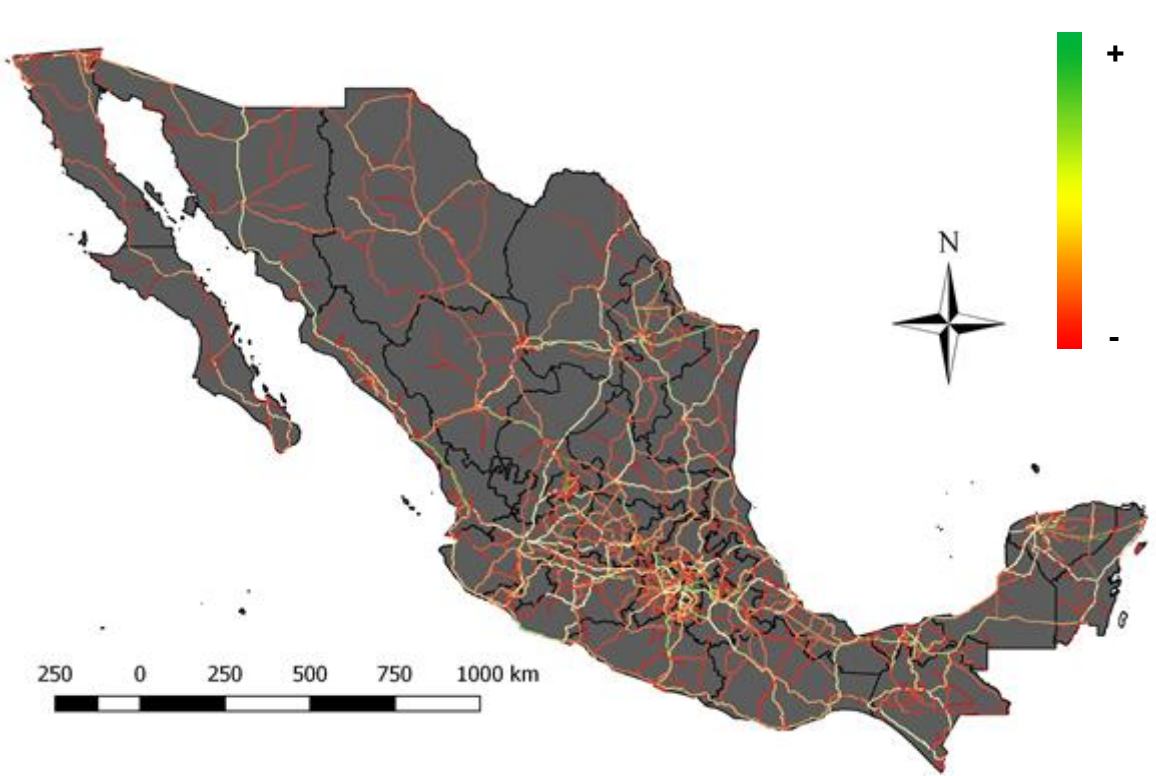
Cabe señalar que este índice combinado con la representación dual puede llegar a presentar casos especiales, como se muestra en la Figura 4.4, ya que existen tramos del camino que inician y terminan en la misma carretera, como ocurre en la carretera de cuota Tlaxco - Tejocotal. Este tramo inicia y termina en la carretera Apizaco - Tejocotal, lo cual causa que el índice alfa sea igual a cero al tener solo relación con un arco.

Las carreteras con mayor redundancia (es decir mayor participación en ciclos) se muestran en la Tabla 4.7. En primera posición se encuentra la carretera Aguascalientes – Zacatecas, seguida de la carretera de cuota México - Querétaro y Mérida - Puerto Juárez. En la Figura 4.5 se muestra un mapa a nivel nacional con el nivel de redundancia de las carreteras, en la cual de color rojo se tienen a las carreteras con menor redundancia y en color verde las de mayor redundancia. En ésta se pueden apreciar las carreteras Aguascalientes – Zacatecas y México – Querétaro (cuota) de color verde. También se observan carreteras importantes en los estados de Nuevo León y Yucatán.

Estos resultados pueden llegar a ser de utilidad para la planeación de rutas en la cadena de suministro, ya que si se tuviera el caso de tener dos o más rutas óptimas posibles se podría llegar a seleccionar la que presente una mayor redundancia.

Tabla 4.7. Carreteras con mayor índice alfa

Carretera	Alfa
Aguascalientes - Zacatecas	0.022463
México - Querétaro (Cuota)	0.020799
Mérida - Puerto Juárez	0.019135
Los Reyes - Zacatepec	0.018303
Tepic - Mazatlán	0.018303
México - Pachuca (Libre)	0.017471
Monterrey - Nuevo Laredo (Libre)	0.017471
Monterrey - Reynosa (Libre)	0.016639
Zacatecas - Durango	0.015807
Querétaro - San Luis Potosí	0.015807
Cuernavaca - Chilpancingo	0.015807
Santa Bárbara - Izúcar de Matamoros	0.015807
Toluca - Morelia	0.015807
Coatzacoalcos - Villahermosa	0.015807
Villahermosa - Francisco Escárcega	0.014975

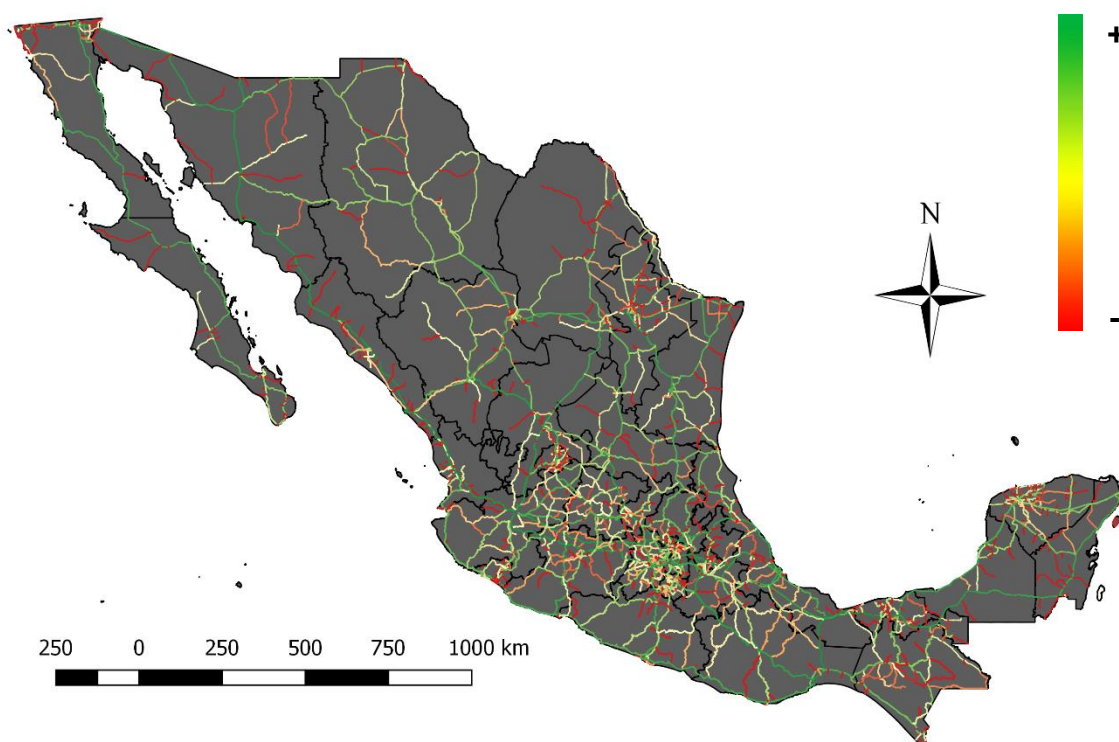


Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.5. Niveles de redundancia de la red de carreteras de México

4.3.2 Índice de centralidad por intermediación

El índice de centralidad por intermediación, como ya se mencionó anteriormente, mide el nivel de importancia de los tramos carreteros de acuerdo a su participación en las rutas más cortas. En la Figura 4.6 se muestra el resultado de estimar éste índice en la red de carreteras de México, mostrando de color verde los tramos carreteros con mayor centralidad y variando hasta llegar al color rojo que simboliza un nivel de centralidad baja. Se puede observar que los tramos carreteros de tipo ramal y accesos a poblaciones presentan en su mayoría un valor de cero.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.6. Niveles de centralidad por intermediación, de la red de carreteras de México

En la

Tabla 4.8 se enlistan las 15 carreteras que presentan los principales niveles de centralidad. En la primera posición se observa la carretera Coatzacoalcos - Salina Cruz la cual atraviesa de sur a norte los estados de Oaxaca y Veracruz, dando como resultado que sea atravesada por todas las rutas que comunican los extremos del país. En seguida se encuentran las carreteras Tepic – Mazatlán y Coatzacoalcos – Villahermosa. También se pueden observar en la lista carreteras que intuitivamente

deberían aparecer en los primeros lugares, como son la carretera México - Querétaro (Cuota) y el Libramiento Norte de la Ciudad de México (Cuota).

Tabla 4.8. Carreteras con mayor índice de centralidad por intermediación

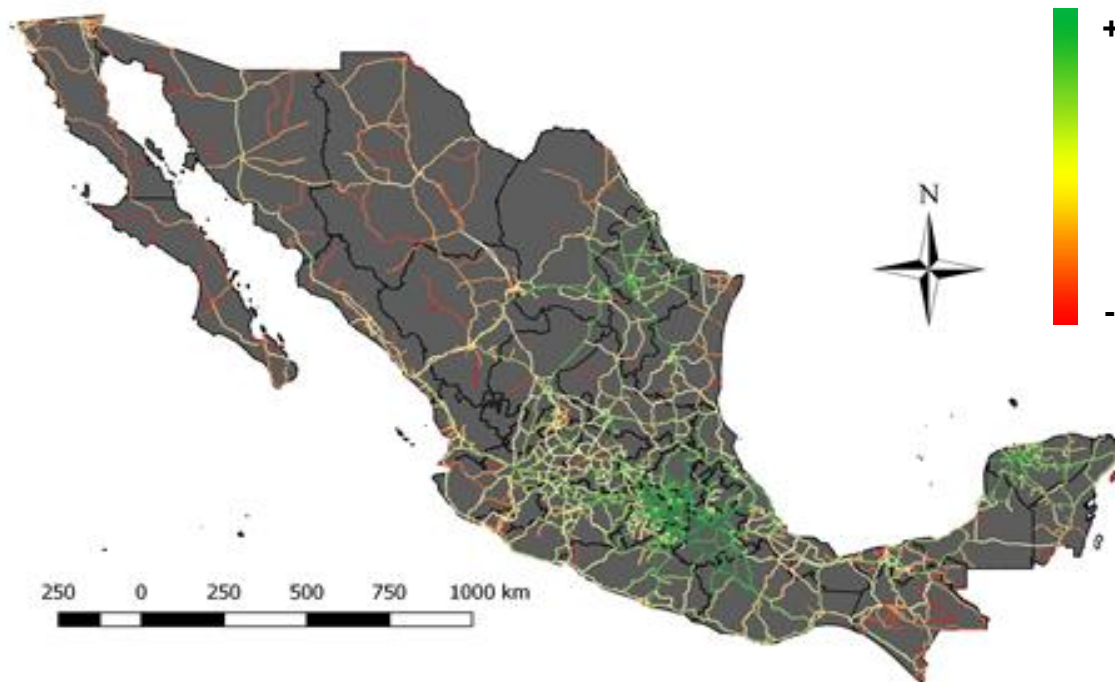
Carretera	Cent. por intermediación
Coatzacoalcos - Salina Cruz	1.000000
Tepic - Mazatlán	0.986115
Coatzacoalcos - Villahermosa	0.981194
Guadalajara - Tepic	0.891904
Libramiento Norte de la Ciudad de México (Cuota)	0.852811
Mazatlán - Culiacán	0.789648
Libramiento de Mazatlán	0.789255
Culiacán - Los Mochis	0.695604
Est. Don - Nogales (Cuota)	0.681779
Los Reyes - Zacatepec	0.634163
Morelia - Jiquilpan	0.612874
México - Querétaro (Cuota)	0.605783
Jiquilpan - Guadalajara	0.604223
Zapotlanejo - Guadalajara (Cuota)	0.565998
Maravatío - Zapotlanejo (Cuota)	0.548547

4.3.3 Índice de poder de Bonacich

De acuerdo a como se establecieron los parámetros del índice de poder de Bonacich (o también conocido solamente como índice de poder), se puede interpretar como una medida de centralidad de un tramo carretero tomando en cuenta la centralidad de sus vecinos inmediatos, mientras más centrales sean los tramos con que intersecta, mayor será su centralidad. Este índice toma valores mayores a cero y va de menor centralidad a mayor centralidad. Cuando una carretera presenta un índice elevado de centralidad, significa que puede llegar a afectar más tramos carreteros, a consecuencia de su posición en la red. También significa la presencia de una mayor conectividad al encontrarse cerca de carreteras bien conectadas. En este caso los valores del índice de poder varían entre 11.4353 y el 0.00257.

En la Figura 4.7 se muestran los resultados de aplicar este índice a la red carretera propuesta. La variación de centralidad de los arcos se muestra en una gama de color que va del verde al rojo, significando mayor a menor centralidad respectivamente. Como se puede apreciar en el mapa, existen tres zonas con alta centralidad en sus elementos carreteros, el más evidente es el que se encuentra en la región centro del país, lo cual solo confirma el fenómeno de crecimiento centralizado que ha presentado el país desde sus inicios. Otras zonas destacadas se encuentran en el estado de Yucatán y Nuevo León. De igual forma se pueden observar las zonas con una baja centralidad en sus elementos carreteros, como son el estado de Chiapas en la parte sur del país y que es un caso prioritario para el

gobierno federal por el desarrollo de las Zonas Económicas Especiales. Por otro lado, al norte se tiene a Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Durango y Sinaloa. Las zonas con mayor centralidad son ideales para establecer cadenas de suministro al presentar una mayor conectividad. Por su parte, las zonas con menor centralidad permiten identificar dónde se requiere mejorar la infraestructura.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.7. Niveles de centralidad del índice de poder de Bonacich, de la red de carreteras de México

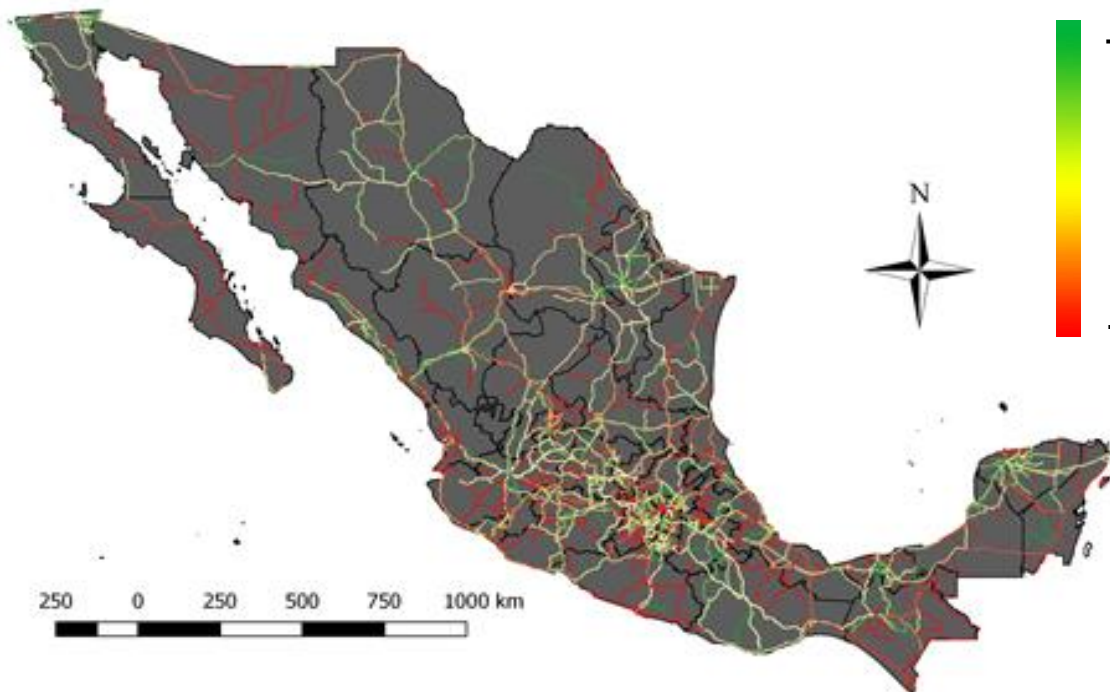
En la Tabla 4.9 se enlistan las 15 carreteras con mayor centralidad, de las cuales la carretera México – Pachuca (Libre) se encuentra presente, al igual que ocurre en la tabla del índice alfa. La carretera México – Puebla, tanto de cuota como la libre, se encuentran con el mayor nivel de centralidad, por lo que las afectaciones que llegue a presentar pueden llegar a impactar a un mayor número de carreteras.

Tabla 4.9. Carreteras con mayor centralidad

Carretera	Poder
México - Puebla (Cuota)	11.4353
México - Puebla (Libre)	11.4212
México - Pachuca (Libre)	10.4999
México - Cuernavaca (Cuota)	9.2116
México - Cuernavaca (Libre)	9.1532
Tlalnepantla - San Gabriel	9.0961
San Gregorio - Oaxtepec	9.0663
México - Toluca (Cuota)	8.9710
Peñón - Texcoco (Cuota)	8.8708
Viaducto Bicentenario	8.7125
Puebla - Huajuapán de León	4.8338
Puebla - Tehuacán	4.7204
Puebla - Acatzingo (Cuota)	4.3935
Puebla - Atlixco (Cuota)	4.0512
Cholula - Puebla (Vía Quetzalcóatl)	3.9810

4.3.4 Coeficiente de agrupamiento

Este indicador representa la relación del número de pares de tramos vecinos que se encuentran comunicados entre el número de pares de tramos vecinos posibles conectados. Es una medida de conectividad interna en grupos de tramos carreteros contiguos, por lo que permite determinar sub-redes bien conectadas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.8. Coeficiente de agrupamiento de la red de carreteras de México

En la Figura 4.8 se muestra el coeficiente de agrupación, donde la variación se muestra en una gama de color que varía del rojo al verde (toma valores de cero a uno), representando un aumento de menor a mayor coeficiente de agrupamiento. Así los tramos que se presentan de color verde cuentan con una mejor conectividad entre sus vecinos inmediatos, mientras que los que se muestran en rojo posiblemente sus tramos vecinos no se comuniquen. Este indicador se puede comparar con el grado del tramo carretero para tener información de más utilidad, ya que de esta manera se podría saber el número de vecinos de cada tramo y así determinar los grupos más importantes con base en su coeficiente de agrupamiento y el número de elementos que participan. Por ejemplo, algún tramo puede presentar un coeficiente de 1 y solo tener dos tramos adyacentes, mientras que otro tramo presente un coeficiente de 0.8 y contar con seis tramos contiguos.

En la Tabla 4.10 se muestran las carreteras con mayor coeficiente de agrupamiento. Estas carreteras se encuentran relacionadas con las capitales de algunos estados, lo cual explica el agrupamiento de sus vecinos adyacentes al presentar mayor conectividad dichos centros urbanos.

Tabla 4.10. Carreteras con mayor coeficiente de agrupamiento

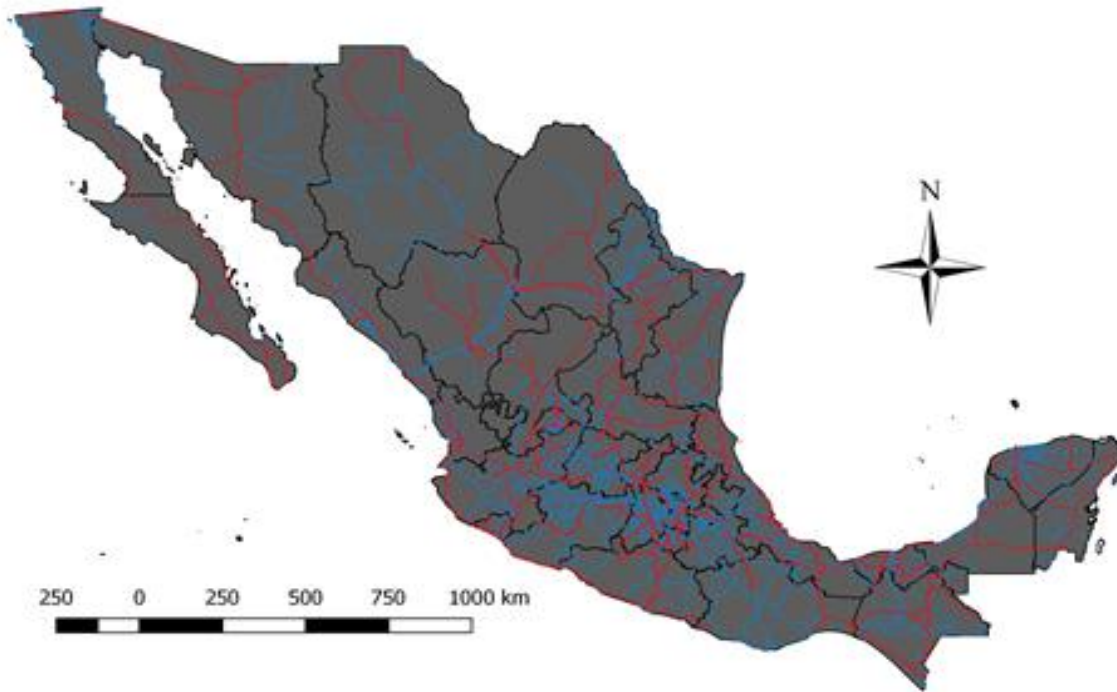
Carretera	Coeficiente de agrupamiento
Santa Rosa - Mezquital	1.0000
Cholula - Puebla (Vía Quetzalcóatl)	1.0000
Villahermosa - Luis Gil Pérez	1.0000
Tecate - Tijuana (Cuota)	1.0000
Tijuana - Ensenada (Cuota)	1.0000
Corredor Tijuana 2000	1.0000
Ramal a Aeropuerto de Chihuahua	1.0000
Reforma - Dos Bocas	1.0000
Libramiento de Saltillo J.L.P.	1.0000
Tecomán - Boca de Pascuales	1.0000
Tecomán - La Mascota	1.0000
Libramiento de San Felipe Torres Mochas	1.0000
Zacatepec - Tlaquiltenango	1.0000
Agualeguas - El Ébano	1.0000
Palo Alto - Vallecillos	1.0000

4.3.5 Nodos de articulación

Los nodos de articulación en la representación dual de la gráfica, son una herramienta útil para conocer aquellos tramos críticos que pueden llegar a ocasionar

zonas desconectadas en caso de presentarse algún tipo de bloqueo. En caso de que fuera necesario valorar el nivel de pérdida de conectividad, es necesario acudir al índice de fragmentación, ya que el indicador de nodos de articulación solo informa si una carretera es un nodo de articulación o no.

En la Figura 4.9 se muestran las carreteras que en la red dual son nodos de articulación, las cuales se destacan de color rojo. En total se trata de 163 nodos de articulación, los cuales han sido clasificados de esta manera ya sea por presentar un tramo contiguo de tipo ramal, que ocasione la desconexión de una población (al menos por carretera pavimentada), hasta desconectar una porción importante de la red. Dichos tramos pueden ser de importancia estratégica para la conectividad del país.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.9. Carreteras que son nodos de articulación en la gráfica dual de la RNCM

4.3.6 Grado

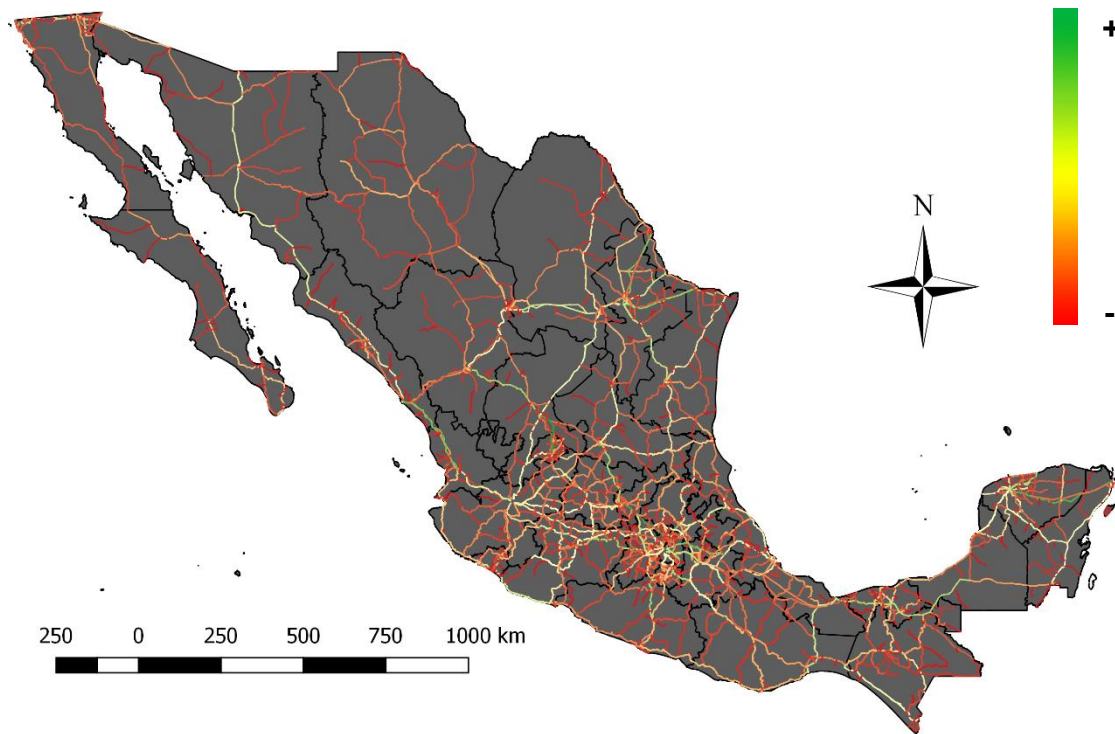
El grado muestra el número de conexiones directas que presenta cada carretera representada en la red dual. Como se mencionó antes, el grado de cada tramo puede complementar los resultados de aplicar el coeficiente de agrupamiento. En la Tabla 4.11 se muestran las principales carreteras de acuerdo a su índice de grado, así como su coeficiente de agrupamiento. En la primera posición se encuentra la

carretera Aguascalientes – Zacatecas con un grado de 28 carreteras adyacentes y un coeficiente de agrupamiento de 0.071 lo cual implica un total de 27 pares conectados de los 378 posibles. Se puede observar que la carretera Monterrey - Nuevo Laredo (Libre) presenta el mayor coeficiente de agrupamiento de la lista con un valor de 0.216, y además presenta un total de 22 carreteras adyacentes, lo cual implica un total de 50 pares de carreteras adyacentes comunicados, con lo que se establece a este tramo carretero y a sus vecinos como la sub-red mejor conectada de los elementos que aparecen en la lista.

Tabla 4.11. Carreteras con mayor índice de grado

Carretera	Grado	Coefficiente de agrupamiento
Aguascalientes - Zacatecas	28	0.071
México - Querétaro (Cuota)	25	0.060
Mérida - Puerto Juárez	24	0.170
Tepic - Mazatlán	23	0.036
Monterrey - Nuevo Laredo (Libre)	22	0.216
México - Pachuca (Libre)	22	0.208
Los Reyes - Zacatepec	22	0.043
Monterrey - Reynosa (Libre)	21	0.181
Coahuila - Villahermosa	20	0.142
Toluca - Morelia	20	0.095
Querétaro - San Luis Potosí	20	0.095
Zacatecas - Durango	20	0.068
Cuernavaca - Chilpancingo	20	0.058
Santa Bárbara - Izúcar de Matamoros	20	0.053
México - Puebla (Cuota)	19	0.322

En el mapa de la Figura 4.10 se muestran los niveles de centralidad de grado de toda la república mexicana, cuya gama de color varia del rojo al verde representando la variación de menor a mayor centralidad.

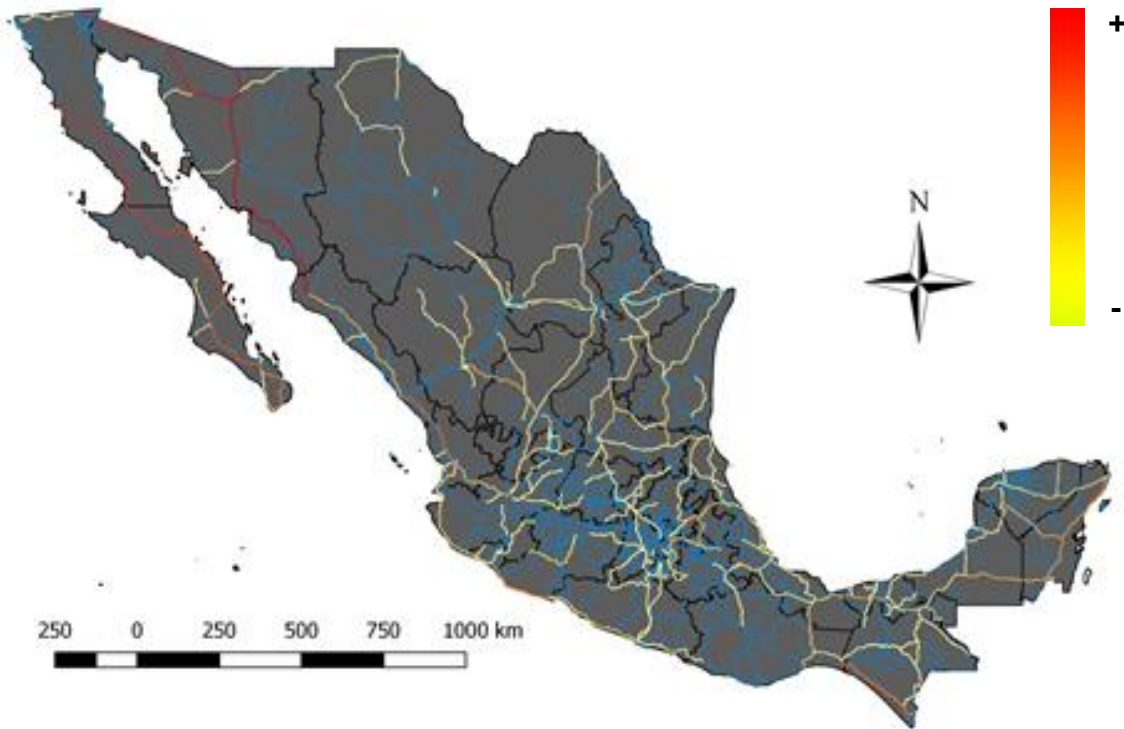


Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.10. Centralidad de grado en la red de carreteras de México

4.3.7 Fragmentación

El indicador de fragmentación permite evaluar el nivel de afectación de los nodos de articulación en la representación dual, en términos de los tramos que quedan incomunicados en la sub-red. En la Figura 4.11 se muestran los niveles de fragmentación de la red que pueden variar entre cero y uno, denotados por una gama de color que va del amarillo al rojo, según aumenta la gravedad de la pérdida de conectividad. Al compararse con el mapa de la Figura 4.9 de nodos de articulación, se puede notar su similitud.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.11. Niveles de fragmentación en la red de carreteras de México

En la Tabla 4.12 se muestra un listado de las carreteras que pueden llegar a tener un mayor impacto al presentar un bloqueo. La carretera Estación Don - Nogales (Cuota) presenta el mayor indicador, seguido de los tramos Santa Ana – Sonoita y Sonoita - Mexicali, provocando que el estado de Sonora sea poseedor de tres tramos con altos niveles de fragmentación. El estado de Baja California cuenta con dos carreteras que son Lázaro Cárdenas - Entronque Punta Prieta y Entronque Punta Prieta - Guerrero Negro. Por su parte, el estado de Baja California Sur presenta dos tramos también, los cuales son Santa Rosalía - Guerrero Negro y La Paz - Ciudad Insurgentes.

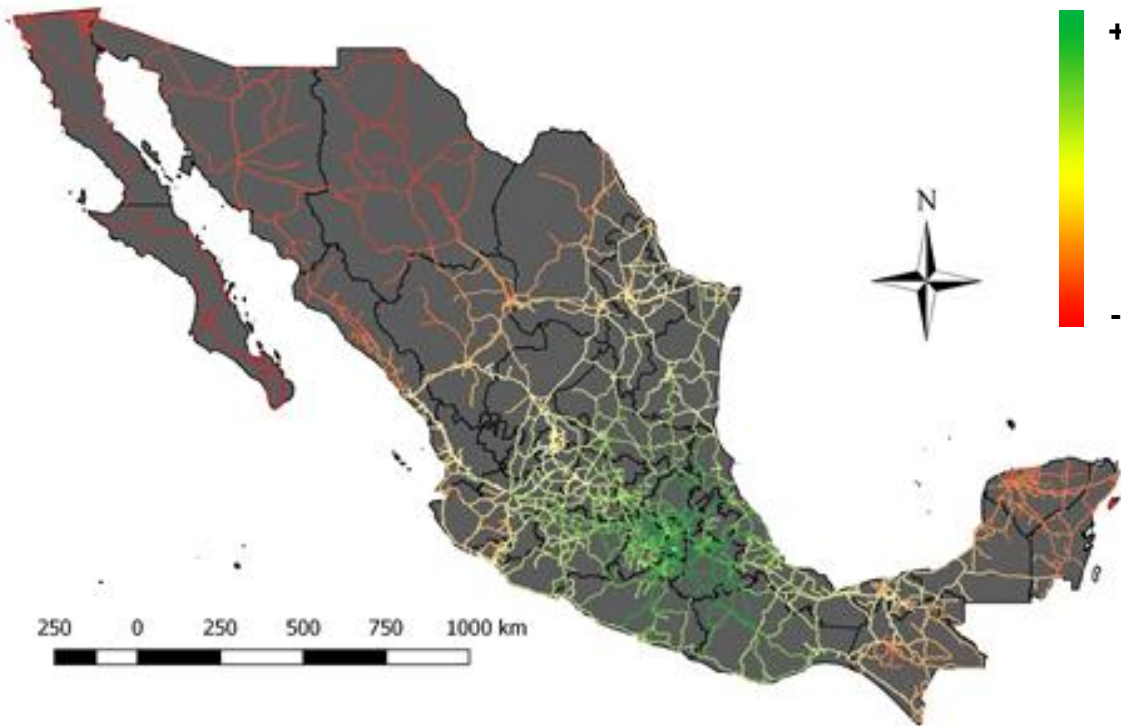
Tabla 4.12. Carreteras con mayor nivel de fragmentación

Carretera	Fragmentación
Est. Don - Nogales (Cuota)	0.120717
Santa Ana - Sonoita	0.107113
Sonoita - Mexicali	0.097856
Lázaro Cárdenas - Ent. Punta Prieta	0.061280
Ent. Punta Prieta - Guerrero Negro	0.058108
Santa Rosalía - Guerrero Negro	0.055136
Loreto - Santa Rosalía	0.047088
Cd. Insurgentes - Loreto	0.045570
La Paz - Cd. Insurgentes	0.040931
Tepic - Mazatlán	0.023107
Tapanatepec - Talismán	0.021464
Cabo San Lucas - La Paz	0.019815
Ent. Playa Azul - Manzanillo	0.018172
Coatzacoalcos - Villahermosa	0.016505
Reforma Agraria - Puerto Juárez	0.013237

4.3.8 Centralidad comparada

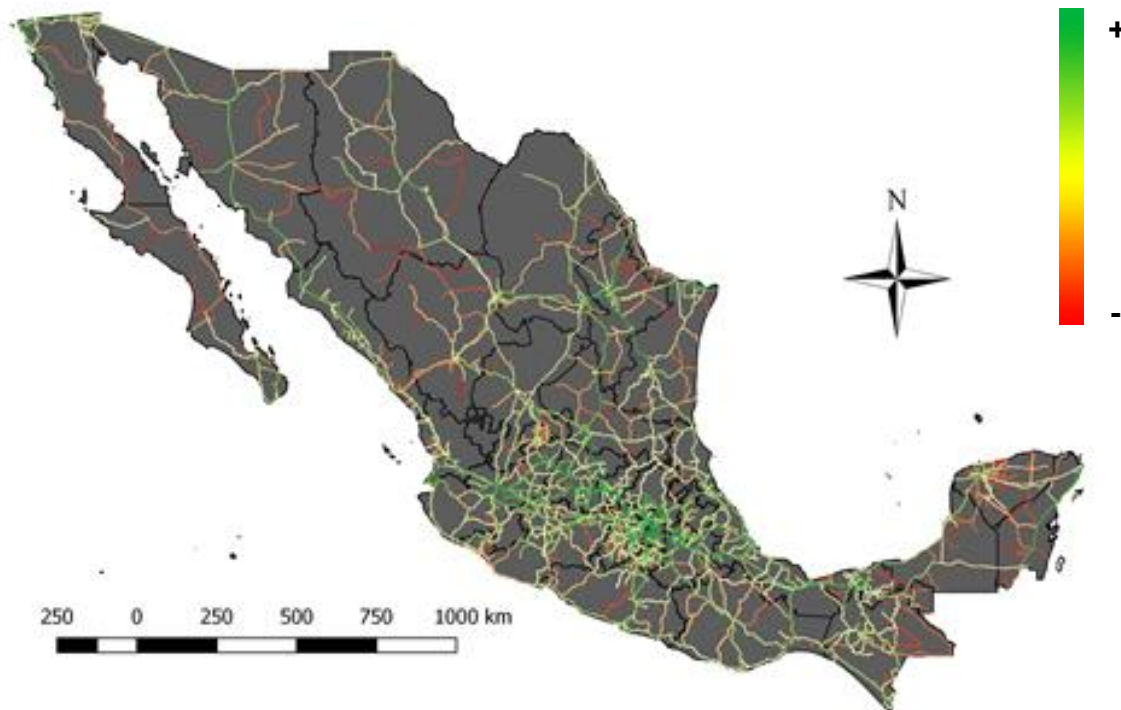
La centralidad comparada en este caso analiza la relación de la centralidad espectral por carretera, con respecto al TDPA ponderado de cada una de éstas. En la Figura 4.12 se muestran los resultados de la evaluación de este indicador, donde la gama de color que va de rojo al verde indica los tramos carreteros con menor a mayor valor de dicho indicador, siendo el cero el mínimo. Los tramos carreteros que se encuentran en la zona centro presentan niveles altos por encima de uno, lo cual refiere que dichos tramos se encuentran por encima de la media nacional y cumplen con su relación centralidad – tránsito. Este conjunto de carreteras suma un total de 200 elementos, que es equivalente al 16.58% de las carreteras consideradas.

En la Figura 4.13 se muestra la distribución del TDPA ponderado a lo largo de las carreteras pavimentadas de México, de color verde se observan los tramos con mayor tránsito, mientras que de color rojo los de menor. En el mapa se pueden observar tramos con niveles importantes de TDPA a lo largo de todo el país, lo que no ocurre en términos de centralidad espectral, pues como se puede ver en la Figura 4.14, los tramos carreteros más importantes se encuentran en el centro del país. Se puede observar cómo los estados de Chihuahua, Sonora, Baja California y Baja California Sur presentan los niveles de centralidad espectral más bajos del país.



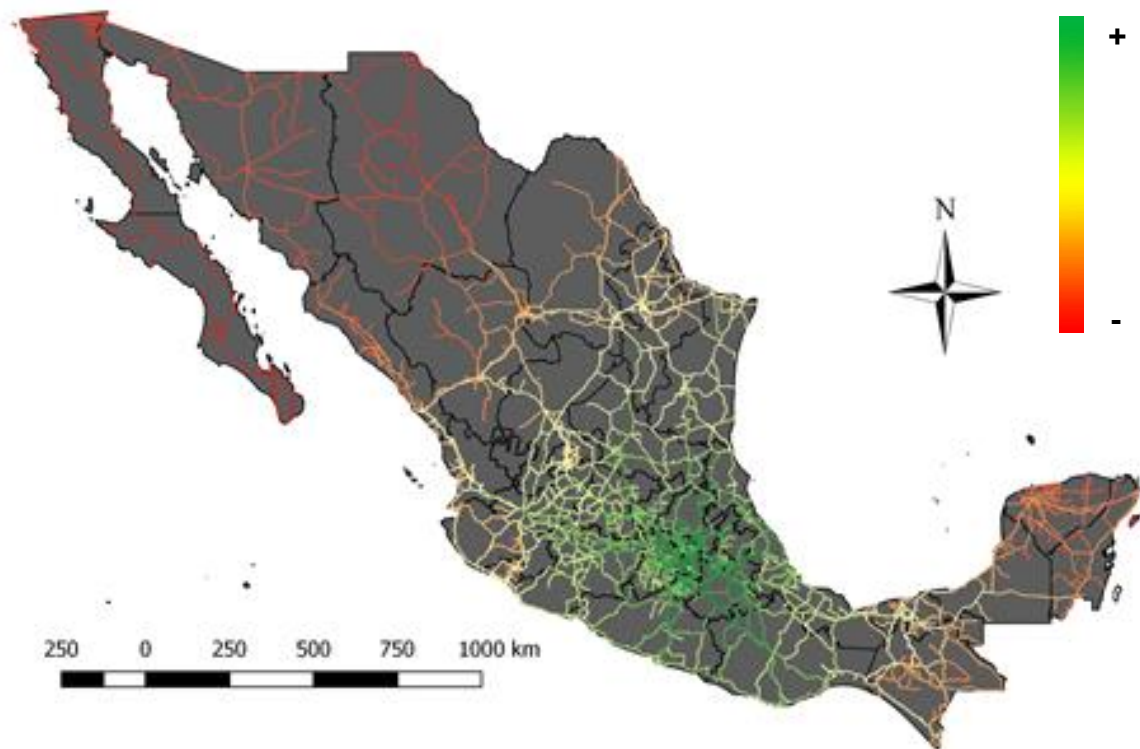
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.12. Centralidad comparada en la red de carreteras de México



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.13. TDPA ponderado en la red de carreteras de México



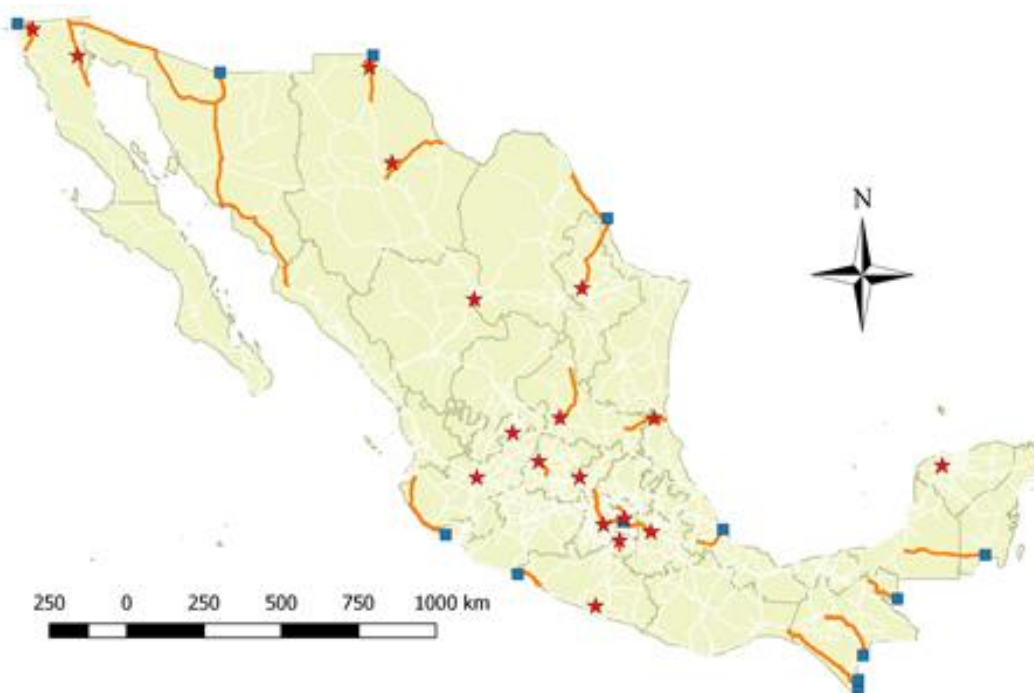
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.14. Centralidad espectral en la red de carreteras de México

4.4 Agrupamiento de carreteras

Como se explicó en la metodología, el paso de agrupamiento de carreteras se acompaña con las respectivas pruebas de correlación entre los distintos índices topológicos calculados y la variación media de las distancias y tiempos de viaje, al simular la falta de cada tramo carretero.

En los resultados correspondientes al cálculo de la variación media en las distancias y tiempos de viaje, se observaron casos en los que no era posible calcular el total de las 234 rutas propuestas, ya que al simular el bloqueo o falta del tramo carretero, el acceso a alguno de los puntos extremos de la ruta se veía afectado. En la Figura 4.15 se muestran las carreteras en cuestión, las cuales en caso de bloqueo afectan el acceso a los puntos representados con estrellas rojas y cuadros azules que representan a las zonas metropolitanas y sitios de interés logístico (puertos fronterizos, marítimos o aeropuertos), respectivamente. En la Tabla 4.13 se muestra una lista completa de las carreteras en cuestión. En las pruebas de correlación se omitieron estas 37 carreteras, dado que la media de la variación de las distancias y tiempos de viaje correspondiente, no incluye la totalidad de las 234 rutas.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.15. Carreteras que al simular su bloqueo no permiten calcular el total de rutas

Tabla 4.13. Lista de carreteras descartadas

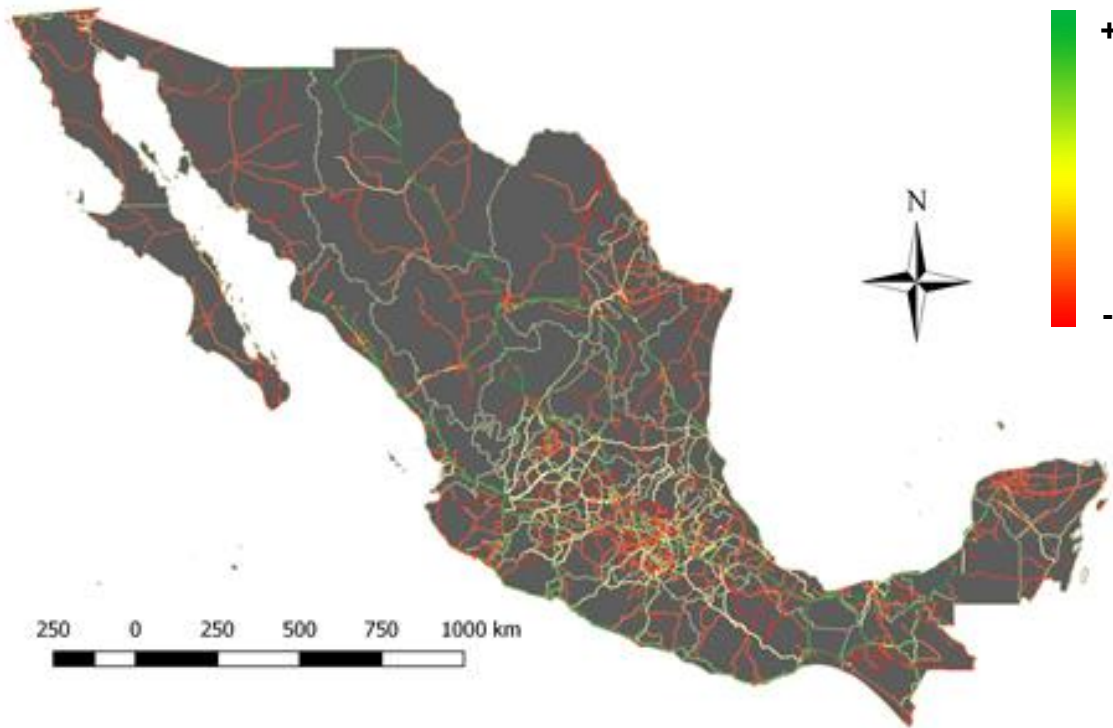
Nombre	Nombre
Aguascalientes - Ent. Cd. de Los Niños	Naucalpan - Toluca
Mexicali - San Felipe	Circuito Exterior Mexiquense (Cuota)
Sonoita - Mexicali	Toluca - Palmillas
Tecate - El Sauzal	La Orilla - Las Truchas
Francisco Escárcega - Chetumal	Tejalpa - Jojutla
Piedras Negras - Nuevo Laredo	Monterrey - Nuevo Laredo (Libre)
Manzanillo - Puerto Vallarta	Querétaro - Estación Chichimequillas
El Suspiro - Tenosique	Ramal a Subteniente López
Ramal a Cd. Hidalgo	Ramal a Aeropuerto Cancún
Tapanatepec - Talismán	Cd. Valles - Tampico
Tuxtla Gutiérrez - Cd. Cuauhtémoc	Ramal a Aeropuerto de S. L. P.
Chihuahua - Ojinaga	San Luis Potosí - Matehuala
Villa Ahumada - Cd. Juárez (Libre)	Libramiento de Nogales (Cuota)
Samalayuca - San Jerónimo (Cuota)	Santa Ana - Sonoita
México - Puebla (Cuota)	Tenosique - El Ceibo
Gómez Palacio - La Unión	Córdoba - Veracruz (Cuota)
Irapuato - León	Ent. Poxilá - Mérida
Libramiento Norte de Acapulco	Est. Don - Nogales (Cuota)
Zihuatanejo - La Mira	

Cada una de las tablas generadas por Minitab de las pruebas de correlación que a continuación se resumen, se incluye en el Anexo A. En la Tabla 4.14 se muestra el resultado de las pruebas de correlación entre los índices topológicos y la variación media de la distancia y el tiempo de viaje, sin aplicar la técnica biclustering. En ambos resultados se puede observar un valor p tan bajo que permite rechazar la hipótesis nula, por lo tanto el coeficiente de correlación es distinto de cero. Como se observa, el índice de centralidad por intermediación presentó la mayor correlación con respecto a la variación media de la distancia y el tiempo, con un valor de 0.483 y 0.450 respectivamente y es importante mencionar que el nivel de correlación no se considera fuerte en este caso ni en los siguientes. A pesar de esto, es interesante dado que se llega a determinar correlación con la centralidad por intermediación aunque no se tomó en cuenta la distancia física entre las carreteras para su cálculo, sino la distancia dentro de la gráfica dual.

Tabla 4.14. Resultados de las pruebas de correlación, todos los datos

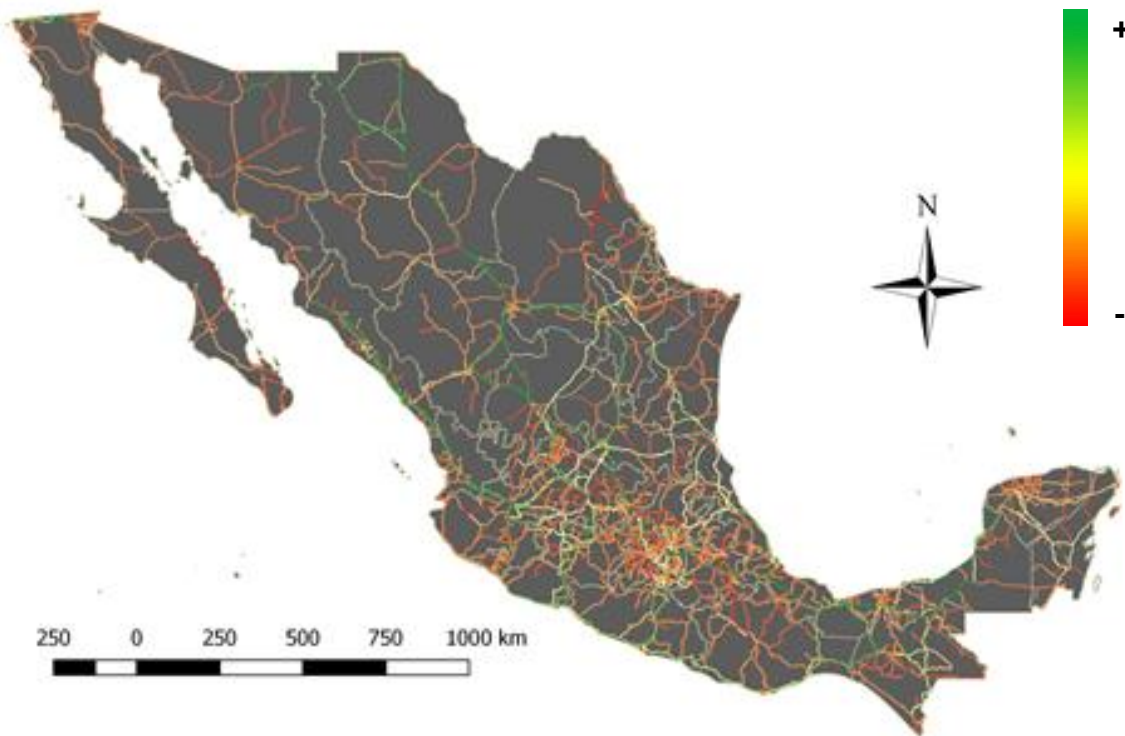
Índice	Distancia		Índice	Tiempo	
	Correlación de Pearson	Valor p		Correlación de Pearson	Valor p
Centralidad por intermediación	0.483	0.000	Centralidad por intermediación	0.450	0.000

Como se menciona en la metodología, estas pruebas de correlación son para determinar la posible relación de los índices topológicos y la robustez de la red carretera nacional, medida a través de la variación media de las distancias y tiempos de viaje, al simular la no disponibilidad de los tramos carreteros. El caso ideal al que se aspiraba es como el que se observa al comparar el mapa de la Figura 4.16 y la Figura 4.17, donde se puede ver una gran similitud entre el aumento de la variación media de la distancia y la variación media del tiempo. Como se presenta en los resultados del Apéndice A, el tiempo y la distancia presentan un coeficiente de correlación de 0.922, lo cual concuerda con los mapas anteriores. Sin embargo, la centralidad por intermediación no presenta una alta correlación con la variación media del tiempo o la distancia, como se puede observar al comparar el mapa de la Figura 4.18 con los mapas de la Figura 4.16 y Figura 4.17.



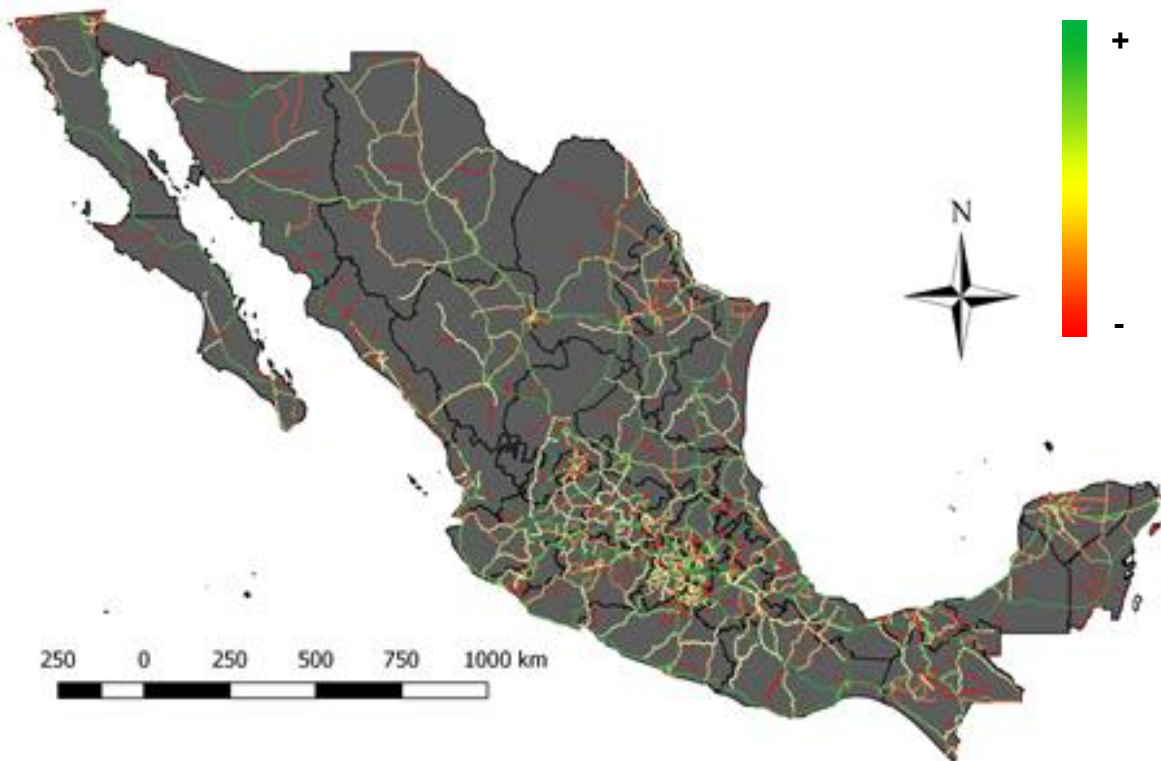
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.16. Aumento de la variación media de la distancia



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.17. Aumento de la variación media de los tiempos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.18. Niveles de centralidad por intermediación, de la red de carreteras de México

Con respecto a la aplicación de la técnica biclustering, se realizaron inicialmente un total de 336 pruebas con los datos sin ser normalizados entre 0 y 1. De éstas, en la Tabla 4.15 se muestra el resultado de la prueba que presentó el mayor principio de homogeneidad determinado por los indicadores ACV y MSRS con valores de 0.9809618 y 0.1732334 respectivamente. En este caso los parámetros son los siguientes: el umbral de ruido se encuentra definido con un valor de 2; el porcentaje mínimo de filas con un valor de 5%; el número mínimo de columnas de 6; el porcentaje máximo de superposición de 20%.

Tabla 4.15. Configuración con mayor grado de homogeneidad, datos sin normalizar

Descripción	Valor
Umbral de ruido	2
Porcentaje mínimo de filas	5
Número mínimo de columnas	6
Porcentaje máximo de superposición	20
Número de biclusters	2
ACV promedio	0.9809618
MSRS promedio	0.1732334

Con las opciones resumidas en la Tabla 4.15 se determinaron un total de 2 conjuntos, de los cuales uno presenta un total de 379 carreteras y 8 índices involucrados. El segundo bicluster presenta un total de 77 carreteras y solo 7 índices involucrados, como se puede observar en la Tabla 4.16.

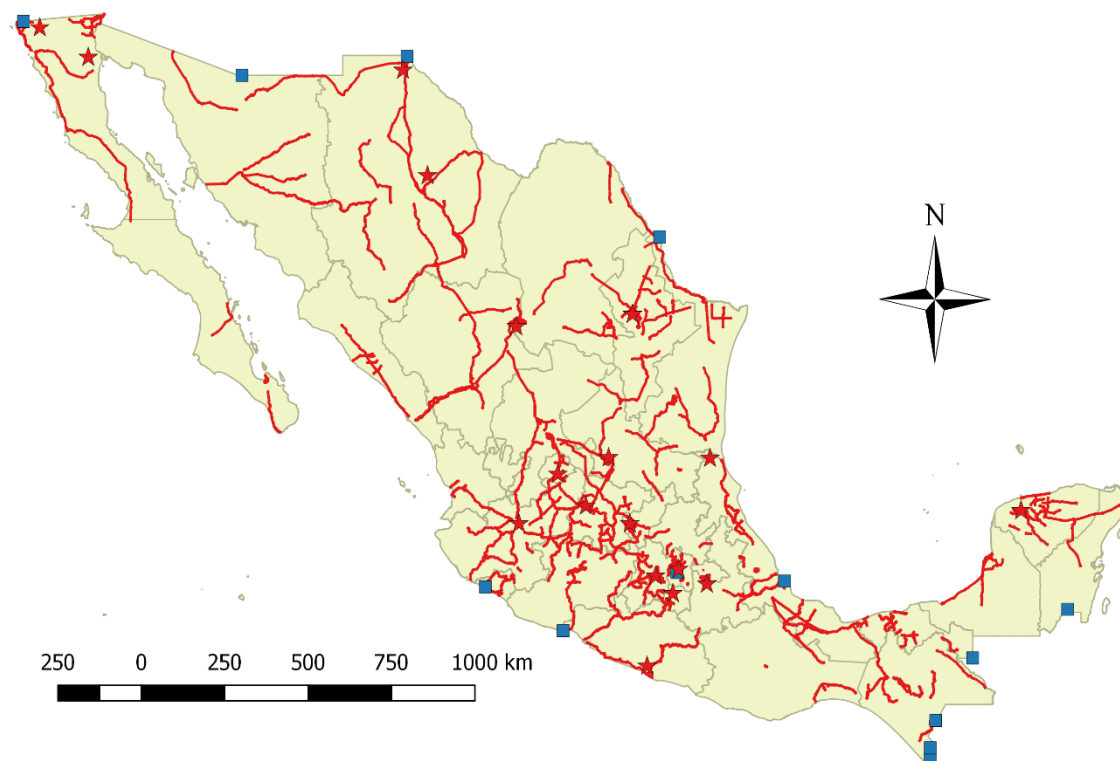
Tabla 4.16. Resultados de la técnica biclustering, datos sin normalizar

Bicluster	No. carreteras	No. Índices	MSRS	ACV
1	379	8	0.16081	0.96756
2	77	7	0.18565	0.99436

Tras determinar los bicluster en que se agrupan las carreteras, se dio paso a las pruebas de correlación. En la Tabla 4.17 se muestran los resultados correspondientes y para el caso del bicluster 1 se observan valores p tan bajos que permiten rechazar la hipótesis nula. Además, se presenta a la centralidad por intermediación y la variación media del tiempo y la distancia con el mayor coeficiente de correlación en el bicluster 1, con valores de 0.278 para el par intermediación-distancia y de 0.336 para el par intermediación-tiempo. Estos resultados pueden concluir una relación débil en ambos casos. En cuanto al bicluster 2, no se presenta ningún resultado importante. En la Figura 4.19 se muestran las carreteras que se agrupan en el bicluster 1.

Tabla 4.17. Resultados de las pruebas de correlación, datos sin normalizar

Bicluster	Distancia			Tiempo		
	Índice	Corr. de Pearson	Valor p	Índice	Corr. de Pearson	Valor p
1	Centralidad por intermediación	0.278	0.000	Centralidad por intermediación	0.336	0.000
2	----	----	----	----	----	----



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.19. Carreteras del bicluster 1, datos sin normalizar

En el caso de la aplicación de la técnica biclustering con los índices topológicos normalizados entre 0 y 1 se realizaron un total de 384 pruebas (se agregó una opción más para el umbral de ruido). A través de estas pruebas se determinaron los valores para los cuatro parámetros libres que permiten alcanzar el mayor principio de homogeneidad, determinado por los indicadores ACV y MSRS con valores de 0.9093664 y 0.0004141, respectivamente. En este caso los parámetros son los siguientes: el umbral de ruido se encuentra definido con un valor de 0.1; el porcentaje mínimo de filas con un valor de 4%; el número mínimo de columnas de 4; el porcentaje máximo de superposición de 25%.

Tabla 4.18. Configuración con mayor grado de homogeneidad, datos normalizados

Descripción	Valor
Umbral de ruido	0.1
Porcentaje mínimo de filas	4
Número mínimo de columnas	4
Porcentaje máximo de superposición	25
Número de biclusters	6
ACV promedio	0.9093664
MSRS promedio	0.0004141

Con las opciones de la Tabla 4.18 se determinan en total 6 conjuntos diferentes los cuales presentan las características de la Tabla 4.19. Como se observa, cinco de los seis bicluster consideran mínimo 7 índices. También cinco de los seis bicluster presentan un ACV mínimo de 0.97402.

Tabla 4.19. Resultados de la técnica biclustering, datos normalizados

Bicluster	No. carreteras	No. Índices	MSRS	ACV
1	481	8	0.00027437	0.49402000
2	161	8	0.00009599	0.99910000
3	180	7	0.00058301	0.97402000
4	67	8	0.00015349	0.99669000
5	63	7	0.00052939	0.99529000
6	67	4	0.00084852	0.99708000

En la Tabla 4.20 se muestran los resultados de las pruebas de correlación de cada uno de los 6 bicluster. Como se puede observar los bicluster 3 y 4 no presentan ninguna correlación entre los índices topológicos y las variaciones medias de las distancias y tiempos. Los bicluster 2 y 3 presentan solamente correlación con la distancia o con el tiempo respectivamente. Por su parte, los bicluster 1 y 5 presentan los mayores coeficientes de correlación entre la centralidad por intermediación y la variación media de la distancia y el tiempo. También se puede ver que las pruebas presentan valores p tan pequeños que permiten rechazar la hipótesis nula y justificar el coeficiente de correlación distinto de cero. Estos resultados no son mejores a los obtenidos en las pruebas realizadas con los datos sin agrupar, sin embargo se mantiene presente la centralidad por intermediación.

Tabla 4.20. Resultados de las pruebas de correlación, datos normalizados

Bicluster	Distancia			Tiempo		
	Índice	Corr. de Pearson	Valor p	Índice	Corr. de Pearson	Valor p
1	Centralidad por intermediación	0.323	0.000	Centralidad por intermediación	0.373	0.000
2	Alfa	0.257	0.001	----	----	----
3	----	----	----	----	----	----
4	----	----	----	----	----	----
5	Centralidad por intermediación	0.397	0.002	Centralidad por intermediación	0.383	0.003
6	----	----	----	Centralidad por intermediación	0.265	0.039

Como se puede observar de las pruebas de correlación, la relación más importante que se puede llegar a definir es la de la centralidad por intermediación y la variación media tanto de la distancia como los tiempos de viaje. En la Tabla 4.21 se muestra una comparación de las carretas con mayor nivel de centralidad por intermediación y la variación media de la distancia y el tiempo. La máxima variación media de la distancia que se llegó a calcular es de 67,779.68 metros la cual se presenta al quitar

de la red al tramo Coatzacoalcos – Villahermosa y que también presenta un nivel importante de centralidad por intermediación, encontrándose en la tercera posición. Con respecto al tiempo, el máximo valor calculado es de 1.02 horas y que se presenta de igual forma en la ausencia de la carretera Coatzacoalcos – Villahermosa. Es importante recordar que los tiempos de viaje fueron calculados con la velocidad de diseño y que las rutas más cortas varían en cada caso, dependiendo de si se usa la distancia o el tiempo para su cálculo.

Tabla 4.21. Comparación de la centralidad por intermediación y la variación media de la distancia y del tiempo de viaje

Carretera	Cent. por intermediación	Var. media de la distancia (m)	Var. media del tiempo (hrs.)
Coatzacoalcos - Salina Cruz	1.000000	7,052.235	0.022754
Tepic - Mazatlán	0.986115	15,544.947	0.162623
Coatzacoalcos - Villahermosa	0.981194	67,779.677	1.026312
Guadalajara - Tepic	0.891904	10,425.419	0.129709
Libramiento Norte de la Ciudad de México (Cuota)	0.852811	2,078.274	0.114783
Mazatlán - Culiacán	0.789648	15,544.947	0.162621
Libramiento de Mazatlán	0.789255	15,544.947	0.162623
Culiacán - Los Mochis	0.695604	15,545.263	0.162642
Los Reyes - Zacatepec	0.634163	1,014.126	0.000018
Morelia - Jiquilpan	0.612874	1,176.513	0.005420

5 Conclusiones

Los costos de los servicios de transporte, así como la conectividad, son temas clave para que México pueda llegar a convertirse en una plataforma logística mundial. El impacto de la estructura de su red carretera sobre la variación en la distancia-tiempo de viaje, es un tema crítico para la competitividad.

Dado que se identificó la falta de investigaciones enfocadas al estudio de las características topológicas de las redes de transporte carretero desde una perspectiva logística, en el presente trabajo se planteó investigar el impacto espacial de la infraestructura de transporte sobre las cadenas de suministro.

Se buscó determinar la influencia que tienen las características de la infraestructura de transporte, sobre la robustez de la red carretera desde un enfoque logístico apoyado en la teoría de gráficas. Este análisis se desarrolló con una visión estratégica enfocada a la logística del transporte de carga y se buscó dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿cómo se puede medir el impacto de la topología de la infraestructura sobre la robustez de un sistema logístico que depende de la red carretera?

Como resultados, de acuerdo a los objetivos planteados, se tiene: i) la caracterización de la infraestructura de transporte desde el punto de vista de la teoría de gráficas; ii) la identificación de los arcos con características similares, mediante el agrupamiento de los mismos para establecer su importancia dentro de la red; y iii) un primer acercamiento para establecer el nivel de robustez de la infraestructura de transporte, mediante el análisis de los escenarios en que se presentan bloqueos de tramos carreteros, para medir su impacto en la red carretera nacional.

El establecimiento de la importancia de los grupos dentro de la red, así como el establecimiento del nivel de robustez de la infraestructura de transporte, quedó muy limitado en su determinación, dado que los resultados de las pruebas de correlación no fueron lo esperado aunque resultaron significativas. Se pretendía encontrar una relación fuerte entre alguno de los índices propuestos y la variación media de la distancia o el tiempo de viaje. Y de esta manera llegar a relacionar la robustez de la red, que comunica los puntos logísticos de importancia para el comercio exterior, con su topología.

En conclusión las contribuciones del presente trabajo son:

- 1) Un sub-sistema que incluye la definición de los indicadores de estructura de la red carretera. En total se tienen ocho indicadores para determinar características como: i) la redundancia de la red; ii) importancia de los arcos de acuerdo a su participación en rutas más cortas; iii) el grado de poder de los tramos carreteros de acuerdo a su relación de adyacencia con los otros; iv) identificación de subredes bien comunicadas; v) tramos críticos que pueden llegar a ocasionar zonas desconectadas en caso de presentarse algún tipo de bloqueo; vi) el número de

conexiones directas que presenta cada carretera; vii) el nivel de afectación al bloquear tramos carreteros de acuerdo al total de tramos incomunicados generados; y viii) la relación del nivel de centralidad de las carreteras, con respecto a su TDPA promedio ponderado.

2) Un sub-sistema que proporciona información de los puntos críticos. De cada tramo carretero se pueden consultar sus características topológicas ya antes mencionadas, así como sus características geográficas, entre otros datos importantes incluidos en la RNCM.

3) El tercer sub-sistema estima indicadores de la influencia sobre las distancias para apoyar la toma de decisiones estratégicas y tácticas en términos de logística. A pesar de la mínima correlación estimada, se puede observar que las carreteras que presentan niveles de centralidad por intermediación importantes, también presentan una importante variación media de la distancia y tiempo de viaje en su ausencia.

Entre las líneas futuras de investigación se propone el desarrollo de un índice de centralidad por intermediación ponderado específico para el caso de la gráfica dual, ya que, tal cual se encuentra definido, no es posible determinar en qué proporción participa cada tramo dentro de las rutas más cortas. Y es el mismo caso para el índice alfa definido en este trabajo, cuya participación de los tramos carreteros dentro de los ciclos no se toma en cuenta. En general, la teoría detrás del caso de la gráfica dual puede ser explorada en mayor medida para el estudio de redes de transporte. Estas limitaciones de los índices enfocados originalmente en el estudio del caso primal de la gráfica, puede que hayan sido un factor importante para los resultados aquí presentados.

Con respecto a la técnica biclustering para el agrupamiento de carreteras con características topológicas similares, se propone probar otras alternativas para este fin, dado que la manera de determinar el mejor biclustering puede llegar a ser muy variable dependiendo de los parámetros seleccionados para las pruebas.

Para la representación gráfica dual se propone como otra línea futura de investigación, establecer un proceso de representación de la red carretera que sea un caso intermedio entre el principio de continuidad basado en el nombre y el propuesto por Freiria y sus colaboradores, dado que en el caso de redes de transporte a nivel nacional, con el primer principio se puede llegar a perder la escala en términos de longitud de los elementos y con el segundo, perder características que influyen en el desarrollo de las carreteras, como son las poblaciones que comunican y que dan origen a su desarrollo.

Aun cuando no se logra probar la hipótesis propuesta cabalmente, sin embargo se logra descubrir cierta relación entre la topología de la red carretera y su robustez, así como la identificación de las limitaciones de la teoría tradicional de los índices y la representación más actual de la gráfica dual.

Referencias bibliográficas

- [1] M. Cedillo-Campos, C. Sanchez-Ramirez, and S. R. Vadali, "Reverse globalization and near-sourcing strategies: impacts of crossing times at US-Mexican border on cross-border supply chains," *Working Paper, COMIMSA, National Council of Science and Technology, MIT-Zaragoza Logistics Center, Texas A&M Transportation Institute.*, 2012.
- [2] M. G. Cedillo-Campos, "L'organisation productive automobile, de la complication a la complexite: Les mÊmes outils d'analyse pour les nouveaux defis de recherche? un cas applique au reseau de valeur de nissan au mexique.," *Onzième Rencontre Internationale du GERPISA*, 2003.
- [3] L. A. Mora-García, *Gestión logística integral. Las mejores prácticas en la cadena de abastecimientos*. Ecoe Ediciones, 2012.
- [4] SHCP, "Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018," *Diario Oficial de la Federación de México*, pp. 114–240, abril 2014.
- [5] DGAF, "Estadística básica del autotransporte federal 2016," 2016.
- [6] K. Schwab, "The Global Competitiveness Report 2016-2017," insight report, World Economic Forum, 2016.
- [7] Secretaría de Economía, "Comercio Exterior / Países con Tratados y Acuerdos firmados con México," Mayo 2015.
- [8] Secretaría de Economía, "Comercio Exterior / Información Estadística y Arancelaria," 2016.
- [9] R. Patarasuk, "Road network connectivity and land-cover dynamics in lop buri province, Thailand," *Journal of Transport Geography*, vol. 28, pp. 111–123, apr 2013.
- [10] D. C. Novak and J. L. Sullivan, "A link-focused methodology for evaluating accessibility to emergency services," *Decision Support Systems*, vol. 57, pp. 309–319, jan 2014.
- [11] F. Bono and E. Gutiérrez, "A network-based analysis of the impact of structural damage on urban accessibility following a disaster: the case of the seismically damaged port au prince and carrefour urban road networks," *Journal of Transport Geography*, vol. 19, pp. 1443–1455, nov 2011.
- [12] R. J. Sánchez and G. Wilmsmeier, *Provisión de infraestructura de transporte en América Latina: experiencia reciente y problemas observados*. Recursos naturales e infraestructura, CEPAL, aug 2005.

- [13] S. Freiria, B. Ribeiro, and A. O. Tavares, "Understanding road network dynamics: Link-based topological patterns," *Journal of Transport Geography*, vol. 46, pp. 55–66, jun 2015.
- [14] M. Cedillo-Campos and C. Sanchez-Ramirez, *ANALISIS DINAMICO DE SISTEMAS INDUSTRIALES*. 2008.
- [15] A. Erath, M. Löchl, and K. W. Axhausen, "Graph-theoretical analysis of the swiss road and railway networks over time," *Networks and Spatial Economics*, vol. 9, pp. 379–400, sep 2009.
- [16] INEGI, "Red Nacional de Caminos. Documento Técnico Metodológico." Archivo electrónico, Diciembre 2015.
- [17] Z. Liu and S. Zhao, "Characteristics of road network forms in historic districts of Japan," *Frontiers of Architectural Research*, vol. 4, pp. 296–307, dec 2015.
- [18] W. Su, G. Yang, S. Yao, and Y. Yang, "Scale-free structure of town road network in southern Jiangsu province of China," *Chinese Geographical Science*, vol. 17, pp. 311–316, dec 2007.
- [19] S. Liu, B. Cui, M. Wen, J. Wang, and S. Dong, "Statistical regularity of road network features and ecosystem change in the longitudinal range-gorge region (LRGR)," *Chinese Science Bulletin*, vol. 52, pp. 82–89, dec 2007.
- [20] Y. Duan and F. Lu, "Robustness analysis of city road network at different granularities," in *Space-Time Integration in Geography and GIScience*, pp. 127–143, Springer Science Business Media, jun 2014.
- [21] F. Xie and D. Levinson, "Measuring the structure of road networks," *Geographical Analysis*, vol. 39, pp. 336–356, jul 2007.
- [22] T. Cheng, J. Haworth, and J. Wang, "Spatio-temporal autocorrelation of road network data," *Journal of Geographical Systems*, vol. 14, pp. 389–413, apr 2012.
- [23] R. Thomson and R. Brooks, "Generalisation of geographical networks," in *Generalisation of Geographic Information*, pp. 255–267, Elsevier BV, 2007.
- [24] Q. Zhang, "Road network generalization based on connection analysis," in *Developments in Spatial Data Handling*, pp. 343–353, Springer, 2005.
- [25] G. Touya, "A road network selection process based on data enrichment and structure detection," *Transactions in GIS*, vol. 14, pp. 595–614, oct 2010.
- [26] L. A. Schintler, R. Kulkarni, S. Gorman, and R. Stough, "Using raster-based GIS and graph theory to analyze complex networks," *Networks and Spatial Economics*, vol. 7, pp. 301–313, sep 2007.

- [27] S. Dunn and S. M. Wilkinson, "Identifying critical components in infrastructure networks using network topology," *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 19, pp. 157–165, jun 2013.
- [28] P. D. Straffin, "Linear algebra in geography. eigenvectors of networks," *Mathematics Magazine*, vol. 53, p. 269, nov 1980.
- [29] S. Porta, P. Crucitti, and V. Latora, "The network analysis of urban streets: A dual approach," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 369, pp. 853–866, sep 2006.
- [30] B. Jiang and C. Claramunt, "Topological analysis of urban street networks," *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 31, pp. 151–162, feb 2004.
- [31] Y. Shi and H. Lu, "Complexity of urban road networks," in *International Conference on Transportation Engineering 2007*, American Society of Civil Engineers (ASCE), jul 2007.
- [32] S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno, M. Chavez, and D. Hwang, "Complex networks: Structure and dynamics," *Physics Reports*, vol. 424, pp. 175–308, feb 2006.
- [33] P. Morgado and N. Costa, "Graph-based model to transport networks analysis through GIS," in *In Proceedings of European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography*, pp. 2–5, sep 2011.
- [34] O. D. Cardozo, E. L. Gómez, and M. A. Parras, "Teoría de grafos y sistemas de información geográfica aplicados al transporte público de pasajeros en resistencia (Argentina)," *Revista Transporte y Territorio*, no. 1, pp. 89–111, 2009.
- [35] M. H. Vallejo, "La utilización de indicadores topológicos en el análisis de redes de comunicaciones. Ensayo sobre la red de carreteras de Cataluña," *Documents d'anàlisi geogràfica*, no. 3, pp. 3–45, 1983.
- [36] J. A. de la Peña and EMALCA-Team, "Sistemas de transporte en México. Un análisis de centralidad en teoría de redes.," *Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, vol. 3, pp. 72–91, sep–dic 2012.
- [37] M. R. y. L. E. S. Regino Criado, "Teoría de Perron-Frobenius importancia, poder y centralidad," *La Gaceta de la RSME*, vol. 17, no. 3, pp. 485–514, 2014.
- [38] L. A. Gradilla-Hernández, "Planeación de infraestructura del transporte: Identificación de tramos críticos para el funcionamiento de redes carreteras," *Publicación Técnica 354*, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 2011.
- [39] DGST, *Manual de proyecto geométrico de carreteras*. SCT, 2016.

- [40] DGST, “Datos viales 2016.” Archivo electrónico: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/2016/>, 2016.
- [41] M. C. E. Febles, “El lenguaje de los grafos en los problemas de redes de comunicación,” *Suma: Revista sobre enseñanza y aprendizaje de las matemáticas*, no. 18, pp. 32–38, 1994.
- [42] L. C. Freeman, “Centrality in social networks conceptual clarification,” *Social Networks*, vol. 1, pp. 215–239, jan 1978.
- [43] A. S. G. Muñiz, R. Álvarez Herrero, and C. R. Carvajal, “Análisis estructural a partir de la teoría de las redes sociales: un nuevo enfoque de un problema clásico,” in *XI JORNADAS OVIEDO 2003*, 2003.
- [44] S. P. Borgatti, “Identifying sets of key players in a social network,” *Computational and Mathematical Organization Theory*, vol. 12, pp. 21–34, apr 2006.
- [45] E. Moreno-Quintero, A. Bustos-Rosales, L. A. Gradilla-Hernández, R. Montoya-Zamora, and C. Martner-Peyrelongue, “Hacia el desarrollo de un modelo nacional de transporte. Primera fase. Construcción de la red intermodal y primeros análisis,” *Publicación Técnica 459*, Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro., 2015.
- [46] INEGI, “Red Nacional de Caminos RNC. 2015.” Archivo electrónico: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825209575>, Mayo 2016.
- [47] A. R. Uresti, “Tlcan y la cuarta ronda de negociaciones,” Octubre 2017.
- [48] R. Romo, R. Almejo, M. Campos, Y. Téllez, L. Ruiz, D. Bartolo, J. López, M. Velázquez, J. L. Llovera, J. L. Escalera, G. E. García, F. Ham, J. K. Bautista, E. C. Rodríguez, E. Ramírez, and M. Ovando, “Catálogo sistema urbano nacional 2012,” tech. rep., CONAPO - SEDESOL, 2012.
- [49] G. del Castillo, A. Peschard-Sverdrup, N. A. Fuentes, S. Corrales, A. Brugués, and V. Barraza, “Estudio de puertos de entrada México-estados unidos: análisis de capacidades y recomendaciones para incrementar su eficiencia,” tech. rep., El Colegio de la Frontera Norte, 2007.
- [50] CEPAL, “Ranking de puertos. Los Top 20 en América Latina y el Caribe en 2016.” *Infografía*, June 2017.
- [51] SCT, “Estadística operacional origen-destino en servicio regular nacional, 2016.” Hoja de excel, Mar. 2017.

[52] Y. Cheng and G. M. Church, "Biclustering of expression data," in *Proceedings of the Eighth International Conference on Intelligent Systems for Molecular Biology* (AAAI, ed.), 2000.

[53] R. Obe and L. Hsu, *PostgreSQL Up & Running*. OReilly, second ed., Dec. 201.

Anexo A. Pruebas de correlación

intermediación	alfa	intermediación	poder
	0.650		
	0.000		
poder	0.407	0.200	
	0.000	0.000	
agrupamiento	0.008	-0.107	0.074
	0.773	0.000	0.011
nodos_articulaci	0.500	0.352	0.022
	0.000	0.000	0.457
grado	1.000	0.650	0.407
	*	0.000	0.000
fragmentación	0.235	0.313	-0.006
	0.000	0.000	0.833
cent_comparada	0.206	0.098	0.673
	0.000	0.001	0.000
distancia	0.336	0.483	0.003
	0.000	0.000	0.914
tiempo	0.341	0.450	0.019
	0.000	0.000	0.522
nodos_articulaci	agrupamiento	nodos_articulaci	grado
	-0.176		
	0.000		
grado	0.008	0.500	
	0.773	0.000	
fragmentación	-0.094	0.449	0.235
	0.001	0.000	0.000
cent_comparada	0.069	0.011	0.206
	0.018	0.716	0.000
distancia	-0.056	0.246	0.336
	0.054	0.000	0.000
tiempo	-0.051	0.217	0.341
	0.080	0.000	0.000
cent_comparada	fragmentación	cent_comparada	distancia
	-0.018		
	0.550		
distancia	0.134	-0.029	
	0.000	0.323	
tiempo	0.107	-0.027	0.922
	0.000	0.353	0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson			
Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 1. Prueba de correlación sin agrupar.

	alfa	intermediación	poder
intermediación	0.278 0.000		
poder	0.202 0.000	0.036 0.484	
agrupamiento	-0.242 0.000	-0.205 0.000	-0.053 0.305
nodos_articulaci	0.256 0.000	0.162 0.002	-0.094 0.071
grado	1.000 *	0.278 0.000	0.202 0.000
fragmentación	0.037 0.472	0.378 0.000	-0.059 0.256
cent_comparada	0.077 0.139	0.068 0.189	0.612 0.000
distancia	0.194 0.000	0.278 0.000	-0.052 0.314
tiempo	0.234 0.000	0.336 0.000	0.011 0.834
	agrupamiento	nodos_articulaci	grado
nodos_articulaci	-0.392 0.000		
grado	-0.242 0.000	0.256 0.000	
fragmentación	-0.148 0.004	0.362 0.000	0.037 0.472
cent_comparada	-0.074 0.154	-0.041 0.428	0.077 0.139
distancia	-0.107 0.039	0.110 0.034	0.194 0.000
tiempo	-0.110 0.034	0.083 0.109	0.234 0.000
	fragmentación	cent_comparada	distancia
cent_comparada	-0.053 0.311		
distancia	-0.000 0.995	-0.059 0.255	
tiempo	-0.011 0.839	0.006 0.907	0.853 0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 2. Prueba de correlación: Bicluster 1 con datos sin normalizar.

	alfa	intermediación	poder
intermediación	0.108 0.377		
poder	0.254 0.035	-0.168 0.168	
agrupamiento	0.121 0.322	-0.223 0.066	0.378 0.001
nodos_articulaci	0.110 0.366	0.129 0.292	-0.268 0.026
grado	1.000 *	0.108 0.377	0.254 0.035
fragmentación	0.020 0.872	0.209 0.085	-0.174 0.153
cent_comparada	-0.040 0.741	-0.009 0.943	0.556 0.000
distancia	0.146 0.230	0.078 0.526	-0.150 0.220
tiempo	0.110 0.370	0.077 0.527	-0.133 0.277
	agrupamiento	nodos_articulaci	grado
nodos_articulaci	-0.526 0.000		
grado	0.121 0.322	0.110 0.366	
fragmentación	-0.275 0.022	0.378 0.001	0.020 0.872
cent_comparada	-0.205 0.090	0.017 0.889	-0.040 0.741
distancia	-0.144 0.238	0.244 0.043	0.146 0.230
tiempo	-0.135 0.270	0.205 0.091	0.110 0.370
	fragmentación	cent_comparada	distancia
cent_comparada	-0.108 0.375		
distancia	-0.023 0.854	-0.116 0.342	
tiempo	-0.026 0.834	-0.108 0.377	0.973 0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 3. Prueba de correlación: Bicluster 2 con datos sin normalizar.

	alfa	intermediación	poder
intermediación	0.386 0.000		
poder	0.322 0.000	0.382 0.000	
agrupamiento	0.627 0.000	0.103 0.025	0.200 0.000
nodos_articulaci	* *	* *	* *
grado	1.000 *	0.386 0.000	0.322 0.000
fragmentación	0.046 0.322	0.016 0.729	0.023 0.618
cent_comparada	0.177 0.000	0.134 0.003	0.622 0.000
distancia	0.094 0.040	0.323 0.000	0.048 0.300
tiempo	0.080 0.083	0.373 0.000	0.228 0.000
nodos_articulaci	agrupamiento * *	nodos_articulaci	grado
grado	0.627 0.000	* *	
fragmentación	0.014 0.766	* *	0.046 0.322
cent_comparada	0.147 0.001	* *	0.177 0.000
distancia	-0.007 0.874	* *	0.094 0.040
tiempo	-0.011 0.814	* *	0.080 0.083
cent_comparada	fragmentación 0.024 0.604	cent_comparada	distancia
distancia	0.006 0.902	0.020 0.659	
tiempo	0.007 0.877	0.105 0.023	0.881 0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 4. Prueba de correlación: Bicluster 1 con datos normalizados.

	alfa	intermediación	poder
intermediación	*		
	*		
poder	-0.062	*	
	0.439	*	
agrupamiento	*	*	*
	*	*	*
nodos_articulaci	*	*	*
	*	*	*
grado	1.000	*	-0.062
	*	*	0.439
fragmentación	*	*	*
	*	*	*
cent_comparada	-0.116	*	0.721
	0.150	*	0.000
distancia	0.257	*	-0.075
	0.001	*	0.350
tiempo	0.114	*	-0.048
	0.155	*	0.552
	agrupamiento	nodos_articulaci	grado
nodos_articulaci	*		
	*		
grado	*	*	
	*	*	
fragmentación	*	*	*
	*	*	*
cent_comparada	*	*	-0.116
	*	*	0.150
distancia	*	*	0.257
	*	*	0.001
tiempo	*	*	0.114
	*	*	0.155
	fragmentación	cent_comparada	distancia
cent_comparada	*		
	*		
distancia	*	-0.066	
	*	0.412	
tiempo	*	-0.065	0.832
	*	0.417	0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson			
Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 5. Prueba de correlación: Bicluster 2 con datos normalizados.

	alfa	intermediación	poder
intermediación	0.396 0.000		
poder	0.443 0.000	0.173 0.021	
agrupamiento	-0.084 0.267	-0.275 0.000	-0.059 0.437
nodos_articulaci	* *	* *	* *
grado	1.000 *	0.396 0.000	0.443 0.000
fragmentación	* *	* *	* *
cent_comparada	0.366 0.000	0.146 0.051	0.847 0.000
distancia	0.011 0.881	0.059 0.434	-0.065 0.392
tiempo	0.033 0.660	0.096 0.201	-0.005 0.945
	agrupamiento	nodos_articulaci	grado
nodos_articulaci	* *		
grado	-0.084 0.267	* *	
fragmentación	* *	* *	* *
cent_comparada	-0.119 0.114	* *	0.366 0.000
distancia	0.010 0.891	* *	0.011 0.881
tiempo	-0.017 0.821	* *	0.033 0.660
	fragmentación	cent_comparada	distancia
cent_comparada	* *		
distancia	* *	-0.055 0.467	
tiempo	* *	-0.034 0.655	0.824 0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 6. Prueba de correlación: Bicluster 3 con datos normalizados.

	alfa	intermediación	poder
intermediación	0.432 0.000		
poder	0.493 0.000	0.510 0.000	
agrupamiento	0.702 0.000	0.642 0.000	0.451 0.000
nodos_articulaci	* *	* *	* *
grado	1.000 *	0.432 0.000	0.493 0.000
fragmentación	* *	* *	* *
cent_comparada	0.252 0.040	0.089 0.474	0.703 0.000
distancia	-0.067 0.591	-0.020 0.873	-0.101 0.416
tiempo	-0.063 0.614	0.030 0.810	-0.108 0.385
	agrupamiento	nodos_articulaci	grado
nodos_articulaci	* *		
grado	0.702 0.000	* *	
fragmentación	* *	* *	* *
cent_comparada	0.099 0.427	* *	0.252 0.040
distancia	-0.037 0.767	* *	-0.067 0.591
tiempo	-0.041 0.742	* *	-0.063 0.614
	fragmentación	cent_comparada	distancia
cent_comparada	* *		
distancia	* *	-0.111 0.370	
tiempo	* *	-0.123 0.322	0.928 0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 7. Prueba de correlación: Bicluster 4 con datos normalizados.

	alfa	intermediación	poder
intermediación	0.478 0.000		
poder	0.149 0.257	0.109 0.408	
agrupamiento	-0.149 0.257	-0.302 0.019	-0.310 0.016
nodos_articulaci	* *	* *	* *
grado	1.000 *	0.478 0.000	0.149 0.257
fragmentación	0.328 0.011	0.316 0.014	0.213 0.102
cent_comparada	0.155 0.236	0.173 0.186	0.883 0.000
distancia	0.093 0.481	0.397 0.002	-0.125 0.343
tiempo	0.097 0.461	0.383 0.003	-0.077 0.561
nodos_articulaci	agrupamiento * *	nodos_articulaci	grado
grado	-0.149 0.257	* *	
fragmentación	-0.194 0.138	* *	0.328 0.011
cent_comparada	-0.338 0.008	* *	0.155 0.236
distancia	-0.172 0.189	* *	0.093 0.481
tiempo	-0.221 0.090	* *	0.097 0.461
cent_comparada	fragmentación 0.216 0.098	cent_comparada	distancia
distancia	-0.097 0.462	-0.123 0.351	
tiempo	-0.107 0.417	-0.121 0.355	0.893 0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 8. Prueba de correlación: Bicluster 5 con datos normalizados.

	alfa	intermediación	poder
intermediación	0.423 0.001		
poder	0.625 0.000	0.357 0.005	
agrupamiento	-0.075 0.564	-0.331 0.009	0.136 0.295
nodos_articulaci	-0.081 0.533	-0.065 0.620	-0.226 0.080
grado	1.000 *	0.423 0.001	0.625 0.000
fragmentación	-0.053 0.687	0.046 0.722	-0.149 0.253
cent_comparada	0.515 0.000	0.519 0.000	0.807 0.000
distancia	-0.056 0.666	0.252 0.050	-0.135 0.298
tiempo	-0.037 0.778	0.265 0.039	-0.068 0.603
	agrupamiento	nodos_articulaci	grado
nodos_articulaci	-0.510 0.000		
grado	-0.075 0.564	-0.081 0.533	
fragmentación	-0.360 0.004	0.431 0.001	-0.053 0.687
cent_comparada	-0.245 0.057	-0.043 0.741	0.515 0.000
distancia	-0.174 0.180	0.203 0.116	-0.056 0.666
tiempo	-0.163 0.208	0.130 0.319	-0.037 0.778
	fragmentación	cent_comparada	distancia
cent_comparada	-0.031 0.813		
distancia	0.031 0.812	-0.046 0.725	
tiempo	-0.008 0.954	0.021 0.874	0.961 0.000
Contenido de la celda: Correlación de Pearson Valor P			

Fuente: Minitab.

Figura A. 9. Prueba de correlación: Bicluster 6 con datos normalizados.