



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla  
Centro Interdisciplinario de Posgrados  
Investigación y Consultoría  
Departamento de Ingeniería  
Doctorado en Planeación Estratégica y Dirección  
de Tecnología

Evaluación de políticas públicas de despliegue de redes de móviles  
de nueva generación en México.

Tesis que para obtener el Grado de Doctor  
en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología

Presenta

Laura Ivonne Contreras Potenciano



**UPAEP – Secretaría General**

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

**Tesis Digitales Restricciones de uso:**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mí familia, por su apoyo incondicional.*



## Agradecimientos

Realizar un doctorado es una aventura que con el apoyo de varios seres extraordinarios es posible culminar satisfactoriamente. Agradezco a mi comité de tesis, a la Dra. Catalina Ovando por acompañarme en esta aventura y a la Dra. Zoraida Frías por compartirme su sabiduría. Agradezco al Dr. Emmanuel por compartir conmigo su tiempo y experiencia. Gracias a mi familia, a mi mamá por ser ese apoyo inquebrantable, a mi papá por motivarme a continuar adelante. Agradezco a mi hermana Diana Irais y a mi hermano Adán por estar siempre a mi lado y brindarme su apoyo cuando los necesito. A mi tío Javier, quien me motivó a iniciar este doctorado. Agradezco también a las personas que me ayudaron a lo largo del camino. A la familia Severiano Conde por apoyarme al inicio de mi investigación. Agradezco a mis compañeros y amigos, Jonathan, Oscar, Liz, Abdiel, Carlos, Juan, Mayra, Melisa, Jesús, Iris, Charly, Chayo, Anacris, Mike, Alejandro, Andy, Edgar, Grace, Jairo, Jorge, Josué, Mari Carmen, Raúl, Steffy, Bere, Christian, Isis por las palabras de aliento tan necesarias en los momentos difíciles, por los pequeños momentos extraordinarios que permanecerán en mi memoria. Agradezco a cada uno de mis profesores, Juan Carlos, Bety, Haydee, Osiris, Alejandro, Irma Juana por sus valiosas enseñanzas que me han permitido lograr el presente trabajo. Les agradezco enormemente a cada una de las personas que pudieron acompañarme y compartir conmigo alguna valiosa experiencia en este proceso. Así mismo, agradezco al Conacyt por el apoyo económico que me permitió realizar esta investigación y a la Universidad Popular Autónoma de Puebla. Gracias.

# Índice general

Resumen

Abstract

Introducción.....	i
Capítulo 1. Propósito y organización.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Preguntas de investigación .....	2
1.3. Propósito de investigación .....	3
1.4. Objetivo general .....	3
1.5. Objetivos específicos .....	3
1.6. Justificación de la investigación .....	4
1.7. Alcances y limitaciones .....	4
1.8. Organización del estudio.....	5
Capítulo 2. Evolución de las Telecomunicaciones Móviles en México.....	7
2.1. Políticas públicas de telecomunicaciones .....	9
2.2. Adopción de tecnologías móviles.....	13
2.3. Características de las tecnologías móviles .....	15
2.3.1 La tecnología 2G va de salida.....	15
2.3.2 La tecnología 3G es la más usada.....	15
2.3.3 Evolución de la tecnología 4G .....	16
2.3.4 Distribución del espectro LTE .....	16
Capítulo 3. Medidas de desempeño de las redes 4G en el Pueblo Mágico de Arteaga, Coahuila.....	18

3.1	Elementos relevantes en la medición del desempeño de la calidad en el servicio móvil .....	22
3.2	Datos y mediciones .....	24
3.3	Metodología .....	26
3.4	Análisis de resultados .....	28
3.5	Conclusiones.....	29
Capítulo 4. Adopción de la Tecnología Móvil en México .....		31
4.1	Definición de variables y mediciones .....	31
4.2	Procesamiento de los datos .....	33
4.3	Resultados .....	34
4.4	Conclusiones.....	37
Capítulo 5. Caracterización de la estructura de la red móvil LTE .....		38
5.1	Definición de variables y mediciones .....	39
5.2	Geotipos.....	40
5.3	Procesamiento de los datos .....	40
Capítulo 6. Resultados .....		42
6.1	Estrategias de despliegue de bandas .....	42
6.2	Estrategias de aumento de capacidad de la red .....	44
6.3	Porcentaje de uso de las bandas de frecuencia.....	49
6.4	Clasificación de municipios según su infraestructura móvil.....	56
Capítulo 7. Análisis y discusión .....		62
Conclusiones y recomendaciones		
Referencias		
Anexos		
Índice de figuras		

## Índice de tablas

## Resumen

La apertura del mercado de las telecomunicaciones a la competencia ha creado mayores oportunidades para la conectividad dentro de un sector económico más amplio y motivando el desarrollo social. El objetivo de esta tesis es analizar las redes *Long Term Evolution* (LTE) de los principales operadores móviles en México para medir la incidencia de las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas de baja densidad de población. Se realizó un análisis de sensibilidad utilizando datos *crowdsourced* de *Mozilla Location Service* (MLS) y de *OpenCellid* de los cuatro principales operadores móviles en red en México desde el 2013 al 2020. Se clasificaron los municipios de acuerdo con su infraestructura móvil utilizando un análisis de *clusters* de K-medias. Como resultado de esta investigación se analizaron las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas de baja densidad de población. Entre las principales conclusiones se encuentran que la Red Compartida Mayorista ha cumplido con los primeros dos hitos de cobertura, sin embargo, actualmente se encuentra en un concurso de acreedores. Así mismo, las intervenciones del IFT en materia de regulación de precio han sido efectivas, en contraste con las de competencia en donde el agente preponderante sigue teniendo más del 50% de la cuota de mercado. Respecto al uso del espectro y la infraestructura desplegada se concluye que estos recursos no se han utilizado en su máxima capacidad. Finalmente se brinda una perspectiva respecto al futuro de las telecomunicaciones móviles en México.

## Abstract

The opening of the telecommunications market to competition has created greater opportunities for connectivity within a broader economic sector and motivated social development. The objective of this thesis is to analyze the Long Term Evolution (LTE) networks of the main mobile operators in Mexico to measure the impact of public deployment policies on the coverage of areas with low population density. A sensitivity analysis was performed using crowdsourced data from *Mozilla Location Service* (MLS) and *OpenCellid* of the four main mobile network operators in Mexico from 2013 to 2020. Municipalities were classified according to their mobile infrastructure using an analysis of K-means clusters. As a result of this research, the public policies of deployment in the coverage of areas with low population density were analyzed. Among the main conclusions are that the Wholesale Shared Network has met the first two coverage milestones, however, it is currently in bankruptcy. Likewise, IFT's interventions in price regulation have been effective, in contrast to those of competition where the predominant agent continues to have more than 50% of the market share. Regarding the use of the spectrum and the infrastructure deployed, it is concluded that these resources have not been used to their maximum capacity. Finally, a perspective is provided regarding the future of mobile telecommunications in Mexico.

## Introducción

El acceso a herramientas digitales puede tener un fuerte impacto en la inclusión. Además, el progreso tecnológico tiene el potencial de mejorar el bienestar y eliminar las barreras sociales (OECD, 2020). Aunado a lo anterior, los derechos humanos, la política, la cultura, la educación, la economía y muchos otros aspectos sociales se ven grandemente influenciados por las telecomunicaciones (Álvarez, 2018). Así mismo, el estado de emergencia mundial causado por el virus Covid-19, registró dentro del sector de las telecomunicaciones una demanda creciente en el uso y acceso a los servicios. También, los incentivos de inversión en redes y equipamiento se vieron reducidos debido a la falta de claridad financiera y macroeconómica en el corto y mediano plazo (The CIU, 2020). Por otro lado, desde que se inició la Reforma de Telecomunicaciones en México en el 2013, las políticas de telecomunicaciones se han comprometido a promover la competencia y la asequibilidad (IFT, 2017). Además, el servicio móvil de acceso a internet en México, registró una tasa de crecimiento anual del 11.7% (IFT, 2019a). Sin embargo, en el 2019, el operador de Telefónica en México empezó a devolver el espectro IMT que tenía asignado debido a los altos costos, ya que tienen planes de quedarse en el mercado únicamente como operador móvil virtual (IFT, 2020b). Aunado a lo anterior, AT&T devolvió el espectro que tenía asignado a la banda de 800 MHz en diversas regiones del país (IFT, 2020e). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es analizar las redes LTE de los principales operadores móviles en México para medir la incidencia de las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas de baja densidad de población. A continuación, se describen las características principales de cada Operador Móvil con Red (OMR) que se analizó en el desarrollo de esta tesis.

El primer operador que se analizó en esta tesis es el operador móvil preponderante en México con una cuota de mercado del 71% (IFT, 2020f) respecto al número de líneas al segundo trimestre del 2020. Así mismo, en el 2021 el IFT planea subastar las bandas de 600 MHz y lo que resta de la banda de 3.5 GHz, comúnmente utilizada para 5G. El operador cuenta con 100 MHz en la banda de 3.5 GHz, al haber comprado 50 MHz de

la compañía Axtel y al haber recibido mediante un traspaso de Telmex otros 50 MHz, por lo que es incierta la participación de este operador en las subastas del IFT del 2021 (Lucas, 2020a). También cuenta con una tenencia espectral total del 26.4%, en donde el máximo permitido es del 35%. Aunado a lo anterior, para febrero del 2021 cuenta con el 44.44% del total del espectro IMT en México (IFT, 2021a).

El segundo operador tiene el 16% de la cuota de mercado al segundo trimestre del 2020, respecto al número de líneas (IFT, 2020f). Por otro lado, en el 2019 este operador regresó el espectro que tenía asignado en la banda de 800 MHz debido al alto costo de arrendamiento (C. Martínez, 2020). El costo total del espectro en 2019 representaba para el segundo operador el 14% de sus ingresos, para el tercer operador el 15% y para el primer operador el 5%, de acuerdo a la cantidad de usuarios de cada operador (IFT, 2020e). Este operador arrenda el 36.28% del total del espectro IMT en México (IFT, 2021a).

El tercer operador tiene el 11% de la cuota de mercado al segundo trimestre del 2020, respecto al número de líneas (IFT, 2020f). También, el 4 de diciembre del 2020, fue aprobado por el IFT la devolución del espectro de este operador en las bandas de 800 MHz y de 1900 MHz (PCS) del 31 de diciembre del 2020 al 30 de junio del 2022 (Lucas, 2020b). Así mismo, tiene planeado regresar el espectro de 2500 MHz. En el 2019, contaba con 17.91% del total del espectro disponible en México (IFT, 2019b), en comparación con febrero del 2021 en donde contaba con el 5.46% del total del espectro IMT en México, siendo el operador con la menor cantidad de espectro IMT (IFT, 2021a). Este operador firmó un convenio con el segundo operador en donde utilizaría su infraestructura para brindar servicios, debido a lo anterior se puede concluir que el tercer operador pretende brindar servicios en México como un Operador Móvil Virtual (Cahun, 2019; El Financiero, 2020). A marzo del 2021, el tercer operador había migrado el 35% del tráfico a la red del segundo operador (Lucas, 2021; A. Martínez, 2020).

Por último, el cuarto operador es un operador mayorista. Así mismo, el 1 de abril del 2017 inició el despliegue de la Red Compartida (SCT, 2020). Este operador tiene

cobertura en 48 zonas comerciales y 80 Pueblos Mágicos (63% de la población) (Altan Redes, 2021). También 30 Operadores Móviles Virtuales (OMV) ofrecen servicios sobre la red de este operador (Ibarra, 2021). En octubre del 2020 contaba con 5,200 torres, las cuales arrenda a Telesites y a American Tower, siendo estos los principales proveedores de los cuatro OMRs en México (Bnamericas, 2020a). En el 2024 debe de brindar cobertura al 92.2% de los habitantes (Altan Redes, 2020), sin embargo busca ampliar el plazo hasta el 2028 (Bravo, 2021). En febrero del 2021 tiene arrendado el 13.82% del espectro IMT utilizado en México a nivel nacional (IFT, 2021a). En agosto del 2021 fue aprobada su solicitud para entrar a un concurso de acreedores (Vela, 2021).

Por otro lado, en la literatura se encontró que Frías et al. (2020) analizaron el espectro de frecuencia utilizado en las redes 4G en áreas urbanas, en relación con la densidad de los nodos (eNodeB), el ancho de banda disponible, la potencia de señal de referencia recibida (RSRP) y la calidad de señal de referencia recibida (RSRQ). Para esta investigación se utilizó el método propuesto por los autores para analizar a partir de datos *crowdsourced* las estrategias de despliegue de redes móviles de los principales operadores en México. Por otro lado, Oughton & Frías, (2018) calcularon el costo, la cobertura y las implicaciones del despliegue de las redes 5G en Gran Bretaña. Lo hicieron al extrapolar las características 4G LTE y LTE-Advanced para el período 2020-2030. Así mismo, en el trabajo realizado por Oughton et al., (2019) se llevó a cabo un análisis de inversión impulsado por la oferta y la demanda utilizando un estudio de caso de los Países Bajos. En ese análisis, se identificaron las características de cada operador respecto a la cuota de mercado para poder clasificarlos en distintos tipos. Para el análisis de sensibilidad se utilizaron algunas de las variables identificadas por Oughton et al., (2018), las cuales son (i) demanda futura; (ii) cobertura y capacidad; (iii) política y regulación; (iv) modelos económicos y comerciales; y (v) tecnología. Como resultado de esta investigación se analizaron las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas de baja densidad de población. Entre las principales conclusiones se encuentran que la Red Compartida

Mayorista ha cumplido con los primeros dos hitos de cobertura, sin embargo, actualmente se encuentra en un concurso de acreedores. Así mismo, las intervenciones del IFT en materia de regulación de precio han sido efectivas, en contraste con las de competencia en donde el agente preponderante sigue teniendo más del 50% de la cuota de mercado. Respecto al uso del espectro y la infraestructura desplegada se concluye que estos recursos no se han utilizado en su máxima capacidad. Finalmente se brinda una perspectiva respecto al futuro de las telecomunicaciones móviles en México.

# Capítulo 1. Propósito y organización

El enfoque de esta investigación es analizar el contexto de las políticas públicas de telecomunicaciones en México junto con las redes LTE de los principales operadores móviles en México para medir la incidencia de las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas de baja densidad de población. Para llevarlo a cabo se utilizaron datos *crowdsourced* de los principales operadores en México desde el 2013 al 2020 de *Mozilla Location Services* (MLS) y de *OpenCellid*. Este método ha sido utilizada anteriormente por Frias et al., (2020) para analizar el espectro utilizado en redes 4G en Londres. En el siguiente capítulo se presenta la evolución de las telecomunicaciones en México. En el tercer capítulo se presenta el caso de estudio realizado en Arteaga, Coahuila, en donde se comparan las medidas de desempeño de las redes 4G de los Operadores Móviles. En el capítulo cuarto se presenta la adopción de la tecnología móvil utilizando variables de la oferta y la demanda. En el quinto capítulo se presenta la caracterización de la estructura de la red móvil LTE a través de los años. En el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos. En el séptimo capítulo se presenta el análisis y discusión de los resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas del desarrollo de la tesis.

## 1.1. Planteamiento del problema

En la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en el artículo sexto, se reconoce el derecho de acceso a Internet (SCT, 2021a). Lo anterior se encuentra alineado al objetivo número nueve de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en donde se establece que se debe de facilitar el acceso universal y asequible a Internet en los países menos adelantados a más tardar en 2020 (ONU, 2020). Así mismo, la apertura del mercado de las telecomunicaciones a la competencia ha creado mayores oportunidades para la conectividad dentro de un sector económico más amplio y motivando el desarrollo social (OECD, 2019). En México, el número de líneas del servicio móvil de telefonía por cada 100 habitantes equivale al 1.2% de los ingresos laborales (IFT, 2020a). Así mismo, uno de los objetivos del gobierno mexicano a través

del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), órgano regulador de telecomunicaciones en México, es “promover el despliegue, desarrollo y uso eficiente de redes e infraestructura que faciliten el desarrollo del ecosistema digital y fomenten la inclusión digital” (IFT, 2020b, p. 6). Debido a lo anterior, la problemática encontrada es la necesidad de implementar infraestructura de telecomunicaciones que permita el desarrollo de la sociedad.

## 1.2. Preguntas de investigación

A través de la metodología utilizada en esta investigación se puede dar respuesta a las preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el desempeño de los operadores móviles que utilizan la red LTE en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila?
- ¿Cómo ha sido el nivel de adopción de la tecnología móvil en México por área geográfica?
- ¿En qué medida se están utilizando los recursos para extender la cobertura de banda ancha móvil?
- ¿En qué medida han incidido las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas no rentables?

Lo expuesto anteriormente es relevante, ya que existe la necesidad de los operadores móviles de expandir y aumentar la capacidad de sus redes de telecomunicaciones. Así mismo, hay una tendencia global en el aumento en el tráfico de redes móviles. También, existe una demanda creciente de servicios sobre los operadores móviles. Se espera que esta tesis contribuya en afrontar los retos futuros en materia de telecomunicaciones.

### 1.3. Propósito de investigación

El propósito de esta tesis es analizar las redes LTE de los principales operadores móviles con red (OMR) en México. Así mismo, analizar la estrategia de despliegue de red asociada a cada OMR. Para lograrlo se utilizaron datos *crowdsourced* de los principales operadores en México desde el 2013 al 2020 de *Mozilla Location Services* (MLS) y de *OpenCellid*. Lo anterior hace posible medir la incidencia de las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas con baja densidad de población.

### 1.4. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es medir la incidencia de las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas con baja densidad de población.

### 1.5. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta investigación son:

- i. Estudiar las políticas públicas de telecomunicaciones en México.
- ii. Estudiar el mercado de los Operadores Móviles (OM) en México.
- iii. Estudiar las medidas de desempeño de los Operadores Móviles con Red (OMR) y los Operadores Móviles Virtuales (OMV) en una zona rural.
- iv. Estudiar el nivel de adopción de tecnologías móviles desde la oferta y la demanda.
- v. Analizar las estrategias de aumento de capacidad de los OMR.
- vi. Evaluar el uso de las bandas de frecuencia.
- vii. Clasificar los municipios de acuerdo con la infraestructura de red desplegada.
- viii. Medir la incidencia de las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas con baja densidad de población.

## 1.6. Justificación de la investigación

En la literatura se encontraron escasas investigaciones realizadas a partir de datos *crowdsourced*. Se sugiere el desarrollo de técnicas y metodologías que permitan contribuir a diversos estudios, como la planificación y simulación de redes, a partir de datos *crowdsourced*. Esto último debido a que son una fuente que toma relevancia significativa en circunstancias como la que se vivió en el desarrollo de esta tesis, el atravesar por la pandemia covid-19 en donde es necesario el aislamiento social. Así mismo, la metodología utilizada en esta tesis puede ser replicada en diversas zonas geográficas.

## 1.7. Alcances y limitaciones

Medir la estructura de la red móvil a niveles geográficos desagregados es un reto porque hay escasez de datos disponibles públicamente. Para esta investigación se buscaron datos desagregados a nivel geográfico disponibles públicamente. Para el desarrollo de esta investigación se consultaron los datos disponibles en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en México (INEGI, 2020). Así mismo se consultó el órgano regulador de telecomunicaciones en México, el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT). Por su parte, la Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH) que realiza el INEGI en México no se manejan datos geográficos desagregados (INEGI, 2018c). También, en la mayoría de las encuestas de tecnologías en Latinoamérica no se solicitan datos geográficos o no se encuentran disponibles públicamente (ENACOM, 2020; Gobierno de Bolivia, 2017; Gobierno de Chile, 2021; Gobierno de Colombia, 2021; Gobierno de Perú, 2021). Motivo por el cual se trabajó con los datos disponibles públicamente para lograr el objetivo de esta investigación, proponer un modelo de caracterización de la estructura de la red móvil LTE de cada OMR a partir de datos *crowdsourced*.

Otra limitante de la investigación es que no se encontró información disponible públicamente respecto a alguna de las variables relevantes para el estudio, como superficie territorial o densidad de población, en algunos de los niveles más granulares, como manzana Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs), manzana o localidad. Además, la disponibilidad de los archivos *shapefile*, los cuales permiten mapear la información, es muy escasa. Lo anterior debido a que los archivos que se encontraron, al mapearlos usando Stata y R Studio mostraban algunas anomalías.

## 1.8. Organización del estudio

En el siguiente capítulo se presenta la evolución de las telecomunicaciones en México, dividido por la tecnología utilizada actualmente en el país. En el tercer capítulo se presenta un análisis de caso de una zona rural en donde se mide el desempeño de algunas variables de los OM. En el cuarto capítulo se presenta una metodología para inferir el nivel de adopción de la tecnología móvil a partir de variables de la oferta y la demanda. En el capítulo quinto se presenta la metodología aplicada en el desarrollo de la investigación para medir la caracterización de la red de los principales Operadores Móviles con Red (OMR) en México y su estrategia de red asociada a través de los años. Para lograrlo se utilizaron grandes cantidades de datos *crowdsourced*. En el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos. Se presentan en cuatro secciones: a) estrategias de despliegue de bandas, b) estrategias de aumento de capacidad de la red, c) porcentaje de uso de las bandas de frecuencia y e) clasificación de municipios según su infraestructura móvil. En la última sección, se presentan las conclusiones. Entre las principales conclusiones se encuentran que la Red Compartida Mayorista ha cumplido con los primeros dos hitos de cobertura, sin embargo, actualmente se encuentra en un concurso de acreedores. Así mismo, las intervenciones del IFT en materia de regulación de precio han sido efectivas, en contraste con las de competencia en donde el agente preponderante sigue teniendo más del 50% de la cuota de mercado. Respecto al uso del espectro y la infraestructura desplegada se concluye que estos recursos no se han utilizado en su máxima

capacidad. Finalmente se brinda una perspectiva respecto al futuro de las telecomunicaciones móviles en México.

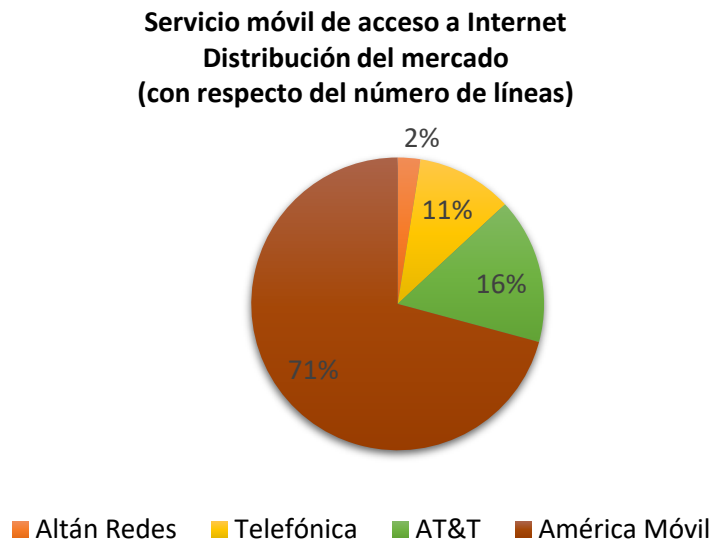
## Capítulo 2. Evolución de las Telecomunicaciones

### Móviles en México

En 1996, el sector de telecomunicaciones en México, después de ser controlado por el estado, se abrió a través de una iniciativa privada. Sin embargo, el mercado estaba altamente concentrado en prácticamente todos los servicios, limitando la cantidad, calidad y variedad de estos. Así mismo, el índice Herfindahl-Hirschman (HHI) señaló que la concentración en México de la telefonía móvil en 2015 era de 5,333 (Ayala et al., 2018). Para esta investigación, se recalculó el índice de concentración del mercado de las telecomunicaciones móviles en México con base en el Informe Estadístico Trimestral del 2do Trimestre de 2020 (IFT, 2020f) dando como resultado 5,390. Lo cual indica un aumento en el índice de concentración respecto al presentado en el 2015. Por otro lado, en 1989 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) una invitación pública para que cualquier empresa pudiera ofrecer el servicio de telefonía móvil (Profeco, 2020). Inicialmente solamente era posible realizar llamadas de voz. Posteriormente se fueron incluyendo más servicios como mensajes de texto, acceso a internet, geolocalización, etc. En la actualidad, la tecnología 4G o de cuarta generación cuenta con un total de 95 líneas por cada 100 habitantes a junio del 2020 (IFT, 2020f).

Así mismo, debido a la alta concentración del mercado, en el 2013 y el 2014 se introdujo una nueva reforma regulatoria para impulsar la competencia en el sector de las telecomunicaciones (IFT, 2017). Una de las principales estrategias fue crear un nuevo agente regulador autónomo, el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT). Este nuevo regulador no depende del gobierno (Ayala et al., 2018). Además, el IFT puede inspeccionar y establecer tarifas de control, eliminar las tarifas de interconexión a otros operadores y liquidar la obligación de compartir la infraestructura activa y pasiva de los jugadores preponderantes. El IFT también tiene poderes para lidiar con problemas de competencia en el sector de telecomunicaciones y radiodifusión (IFT, 2019c). La distribución del mercado al segundo trimestre del 2020 por operador se puede observar en la Figura 1.

**Figura 1** Distribución del mercado (con respecto al número de líneas)



Fuente: (IFT, 2020f)

En la literatura se pueden observar principalmente dos estrategias una enfocada en la infraestructura y otra enfocada en los servicios. La primera consiste en la implementación de una Red Compartida Mayorista (RCM). Las características de la RCM se encuentran especificadas dentro de la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión (LFTR) en los artículos 55, 76 y 142. Esto se encuentra alineado a los artículos 6, 7, 27, 28, 73, 78, 94 y 105 de la Constitución (DOF, 2013). El 29 de Enero del 2016 inició la licitación pública de la RCM, resultado ganador el consorcio Altán Redes el 17 de noviembre del 2019 (PROMTEL, 2018). El consorcio Altán Redes ha cumplido satisfactoriamente con los primeros dos hitos de cobertura. Al 6 de enero del 2020 ha cubierto el 50.18% de la población, teniendo el compromiso de cubrir el 92.2% de la población para el 24 de enero del 2024 (PROMTEL, 2020; Redes, 2020).

La segunda estrategia enfocada a los servicios, consiste en facilitar el acceso al mercado a los Operadores Móviles Virtuales (OMVs) a través del uso de la infraestructura de la Red Compartida Mayorista (IFT, 2020b). Sin embargo, a pesar de los esfuerzos del gobierno, los OMVs no han podido superar el 3% de la cuota de mercado. En el segundo trimestre del 2020 los OMVs tenían el 2.1% de la cuota de

mercado respecto al número de líneas (IFT, 2020f). Actualmente se cuenta con la participación de 53 OMVs (Ibarra, 2021). Al primer trimestre del 2021, existe un total de 126.6 millones de líneas móviles, correspondientes a 70,718 millones de pesos mexicanos durante el periodo. Dentro de esta cantidad, 3.9 millones de líneas corresponde a los OMVs, con ingresos de 711 millones de pesos, lo cual indica que han duplicado su participación en el mercado durante el último año (Piedras, 2021).

## 2.1. Políticas públicas de telecomunicaciones

Como se mencionó anteriormente, en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en el artículo sexto, se reconoce el derecho de acceso a Internet (SCT, 2021a). Lo anterior se encuentra alineado al objetivo número nueve de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en donde se establece que se debe de facilitar el acceso universal y asequible a Internet en los países menos adelantados a más tardar en 2020 (ONU, 2020). Así mismo, en el artículo 9 de la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión (LFTR) se ordena a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) conducir las políticas y los programas de cobertura universal y cobertura social (SCT, 2021b). Por otro lado, en el gobierno de Enrique Peña Nieto se inició el programa de México Conectado, el cual daba servicio a 35 sedes y campus de Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (SCT, 2018). Sin embargo, en el 2019, con el gobierno de Andrés Manuel López Obrador, se decidió cerrar este programa (El Mexicano, 2019) y reemplazarlo por el programa CFE Telecomunicaciones e Internet para Todos. Siendo el objetivo de este último programa prestar y proveer servicios de telecomunicaciones a las regiones detectadas a través de los programas de cobertura social y conectividad en sitios públicos (SCT, 2019). Estos programas se encuentran respaldados por los artículos 9, 15 y 210 de la LFTR en donde se definen las obligaciones de cobertura geográfica, poblacional o social, de conectividad en sitios públicos y de cobertura universal. Así mismo, en los artículos 13, 140, 142 y 144 de la LFTR se definen las características de la RCM. Especialmente en el artículo 142 se establece que el IFT asignará directamente 90 MHz de la banda de frecuencia de 700 MHz para el uso de la RCM. Por otro lado, en el artículo 3 de la

LFTR se establecen los lineamientos de la política de inclusión digital universal. Sin embargo, en México para Julio del 2021 aún no existe una Estrategia Digital Nacional (Hernández Tofoya, 2021). En la Tabla 1 se presentan las políticas públicas analizadas en esta investigación.

**Tabla 1.** Políticas públicas analizadas.

<b>Documento</b>	<b>Política Pública</b>
artículo 6 de la Constitución	El Estado garantizará el derecho de acceso a las tecnologías de la información y comunicación.
artículo 36 de la LOAPF	Corresponde a la SCT planear, fijar y conducir las políticas y programas de cobertura universal y cobertura social.
artículo 210 de la LFTR	La Secretaría de Comunicaciones y Transportes elaborará cada año un Programa de Conectividad en Sitios Públicos.
artículo 15 de la LFTR	Los concesionarios tendrán obligaciones de cobertura geográfica, poblacional o social, de conectividad en sitios públicos y de cobertura universal.
artículos 55,76 y 142 de la LFTR	La Red Compartida contará con “espectro determinado” el cual confiere el derecho de usar, aprovechar y explotar bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico.
artículo 142 de la LFTR	El IFT asignará 90 MHz de la banda de frecuencia de 700 MHz, para la operación y explotación de una red compartida mayorista
artículo 140 de la LFTR	Si existe infraestructura de la RCM en alguna zona geográfica, el gobierno garantizará que el servicio llegue a los usuarios finales.
artículo 143 de la LFTR	El título de concesión de las redes compartidas mayoristas incluirá obligaciones de cobertura, calidad y precio y aquellas que determine el IFT.
artículo 144 de la LFTR	Recalca los principios bajo los que operarán las redes compartidas mayoristas, incluyendo la compartición de toda su infraestructura.
artículo 13 de la LFTR	Establece que el Ejecutivo Federal, a través de la SCT, realizará las acciones tendientes a garantizar la instalación de la Red Compartida.

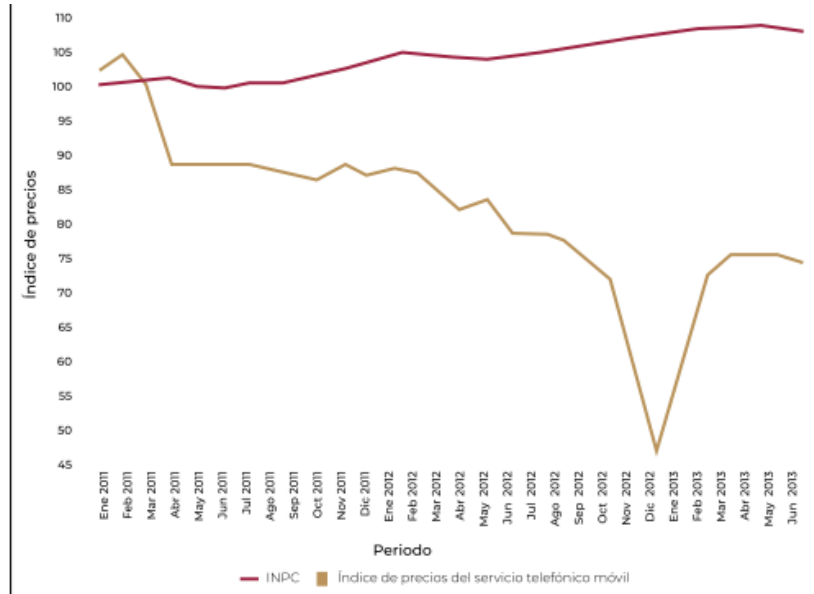
artículo 17 de la Constitución	Establece que el Ejecutivo Federal incluirá en el Plan Nacional de Desarrollo un programa de banda ancha en sitios públicos que identifique el número de sitios a conectar cada año, hasta alcanzar la cobertura universal.
artículo 28 de la LFTR	Establece que, para el logro de la cobertura universal, la Secretaría (SCT) elaborará cada año un Programa de Conectividad en Sitios Públicos.
artículo 210 de la LFTR	Define la política de inclusión digital universal con el propósito de cerrar la brecha digital existente entre individuos, hogares, empresas y áreas geográficas de distinto nivel socioeconómico.

Referencia: Elaboración propia.

Así mismo, desde antes de las reformas de telecomunicaciones del 2013 se ha observado una disminución constante en el costo de los servicios de telefonía móvil, como se puede observar en las Figuras 2, 3 y 4. También, la entrada de nuevos competidores, principalmente OMVs, ha hecho posible que se generen cambios en este mercado, principalmente respecto a precio y calidad de los servicios. Los precios han disminuido de 58.67% desde enero del 2011 hasta diciembre del 2019. Por último, en septiembre del 2019, se contaba con 22 proveedores de servicios LTE y la densidad era de aproximadamente 96 líneas por cada 100 habitantes (Profeco, 2020).

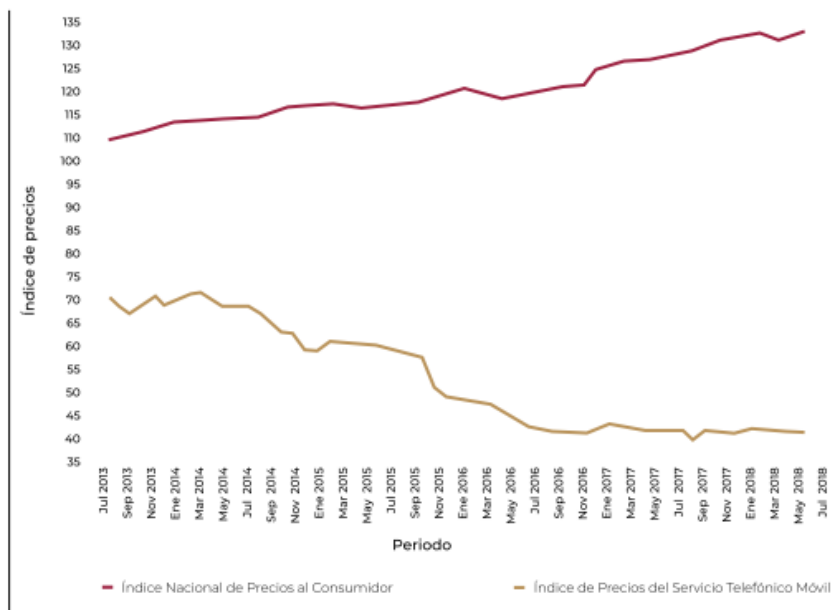
Vale la pena agregar que del 18 de diciembre del 2019 al 15 de Julio de 2020 se llevo a cabo una consulta pública por parte del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), el cual es el órgano regulador en México, para determinar los lineamientos de la gestión y administración de la red. Se llegó a la conclusión de una red neutra con características específica (IFT, 2021b). Uno de los temas tratados en este documento es el *zero rating*, el cual refiere a que los proveedores de servicios móviles tengan la posibilidad de aplicar un costo nulo al tráfico de datos de alguna aplicación específica. Esta práctica es actualmente utilizada en México con algunos de los principales servicios utilizados por los consumidores como Whatsapp o Facebook (R3D, 2021).

**Figura 2** Índice de precios de los servicios de telefonía móvil antes de la Reforma de Telecomunicaciones (2011 a 2013)



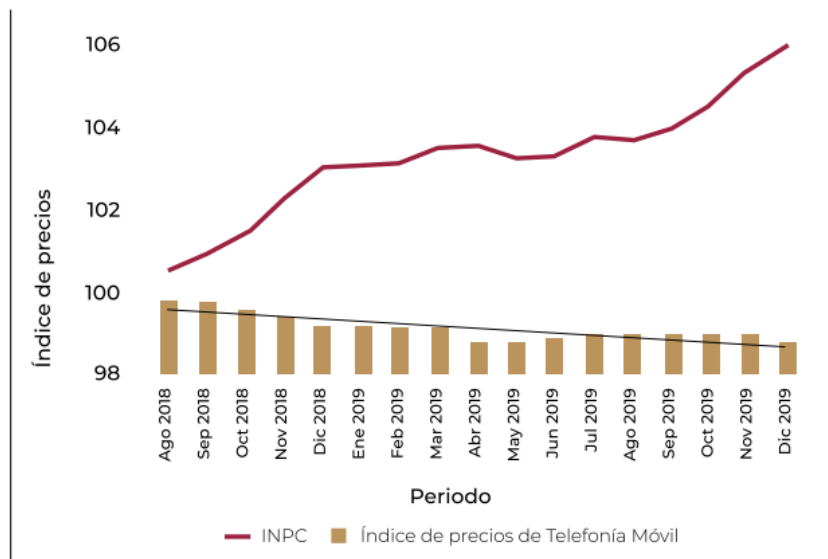
Fuente: Profeco, (2020)

**Figura 3** Índice de precios de los servicios de telefonía móvil después de la Reforma de Telecomunicaciones (2013 a 2018)



Fuente: (Profeco, 2020)

**Figura 4** Índice de precios de los servicios de telefonía móvil (2018 – 2019)



Fuente: (Profeco, 2020)

## 2.2. Adopción de tecnologías móviles

A pesar del impacto de las tecnologías móviles para su inclusión en países emergentes (OCDE, 2020), solo el 53,6% de la población mundial tiene acceso a Internet (UIT, 2021). En México hay un rezago en la adopción de dispositivos móviles tecnologías en algunos sectores de la población (Vommaro, 2018; Tsatsou, 2012; Ayouby et al., 2013). Además, la inversión en infraestructura tecnológica en áreas rurales tiene bajos niveles de cobertura. Por otro lado, los operadores móviles invierten grandes cantidades en el desarrollo de infraestructura, lo que los obliga a invertir bajo demanda (Domínguez, 2018). En esta investigación se utilizó información sobre la infraestructura de los operadores móviles a través de datos *crowdsourced* para medir la demanda.

Medir la adopción de tecnología móvil a niveles geográficos desagregados es un desafío porque hay una escasez de datos disponibles públicamente. Esto se debe a que la información se recopila principalmente a través de encuestas (INEGI, 2021). Esto implica grandes inversiones de capital, ya que es necesario cubrir amplias áreas

geográficas para recopilar información específica. Para esta investigación, trabajamos con los datos disponibles públicamente cumpliendo así uno de los objetivos de esta investigación.

Los datos de fuentes colaborativas se han utilizado para estudios en diversas disciplinas y han mostrado buenos resultados. Un ejemplo de lo anterior es la investigación realizada por Frías et al. (2020) donde analizaron el espectro de frecuencias utilizado en Redes 4G en áreas urbanas. Para esta investigación se utilizó el método propuesto por los autores para analizar desde datos de crowdsourcing el nivel de adopción de tecnologías móviles en México para las variables de oferta. Por otra parte, Oughton & Mathur (2021) presentaron un método de aprendizaje automático que utiliza imágenes de satélite que son públicamente disponible para predecir la demanda de métricas de telecomunicaciones, incluida la adopción de teléfonos móviles. En esta investigación se utilizaron variables de la oferta para obtener información sobre la demanda a niveles geográficos desagregados.

El informe presentado por el IFT (2020f) indica que en 2019 había 31,9 millones de hogares con teléfono móvil. Esto señala un aumento de 4.3% respecto al 2015, donde el 85.1% de los hogares disponían de teléfono móvil. El uso de teléfonos inteligentes aumentado en un 11%. Asimismo, el tráfico de datos que hubo en México en 2018 a través de redes móviles fue 708.32 PB, lo que representa el doble del consumo de 2017. Asimismo, hubo un crecimiento en el uso de 3G y Tecnologías 4G de 32.8% y 116.6% respectivamente, en el período de 2015 a 2018. Por otro lado, en México, hay un promedio de 10 sitios móviles por cada 10 mil líneas activas por estado (IFT, 2020a). En 2019, México tuvo 65.9 en el índice de infraestructura móvil publicado por la GSMA (2020), ubicándose por debajo de países como como Malasia y Marruecos con 66.8 y 66.3 respectivamente. En el capítulo 3 de esta tesis se profundiza respecto a la adopción de las tecnologías móviles en México. En las siguientes secciones se presenta un panorama general respecto a las tecnologías móviles en México.

## 2.3. Características de las tecnologías móviles

El tráfico de datos que hubo en México en el 2018 mediante las redes móviles fue de 708.32 PB, lo que representa el doble del consumo del año 2017. Así mismo, hubo un crecimiento en el uso de las tecnologías 3G y 4G de 32.8% y 116.6% respectivamente, en el periodo del 2015 al 2018. Por otro lado, en México se tienen en promedio 10 sitios móviles por cada 10 mil líneas activas por entidad federativa (IFT, 2020d). En las siguientes secciones se presentan las características de cada tecnología de telecomunicaciones móviles presente en México.

### 2.3.1 La tecnología 2G va de salida

Introducida por primera vez en 1992, es la segunda generación de tecnología de telefonía celular y la primera en utilizar el cifrado digital de las conversaciones. Las redes 2G fueron las primeras en ofrecer servicios de datos y mensajería de texto SMS, pero sus tasas de transferencia de datos son más bajas que las de sus sucesores (GSMarena, 2020). De acuerdo al reporte realizado por el IFT (2020a), en México la cobertura garantizada de los prestadores del servicio móvil por cada 100 habitantes en el 2018 para la tecnología 2G era igual a 93.51; la distribución del tráfico del servicio móvil de internet era del 0.27% y había en total 25,339 sitios celulares para la prestación del servicio público de telecomunicaciones móviles en la tecnología 2G en el 2018. Actualmente, las redes 2G se utilizan como redes de respaldo para el tráfico de voz y mensajes, debido a que sus características técnicas no son suficientes para soportar la demanda de datos de aplicaciones recientes. El operador AT&T informó el cese de operaciones para su red 2G a partir de marzo de 2019 (IFT, 2020a).

### 2.3.2 La tecnología 3G es la más usada

En el reporte realizado por el IFT (2020a) se informa que la cobertura garantizada de los prestadores del servicio móvil en México por cada 100 habitantes en el 2018 para la tecnología 3G era igual a 94.3. Así mismo, la distribución del tráfico del servicio móvil de internet sobre la tecnología 3G era del 29.25%. Además, había 54,819 sitios

celulares para la prestación del servicio público de telecomunicaciones móviles en el 2018. Cabe recalcar que la tecnología 3G es la que tiene el mayor número de sitios desplegados en México, seguida por la tecnología 4G (40,656 sitios en total). Aunado a lo anterior, la tecnología 3G aumentó su cobertura de 71 a 94.3 por cada 100 habitantes a nivel nacional en el periodo del 2017 al 2018.

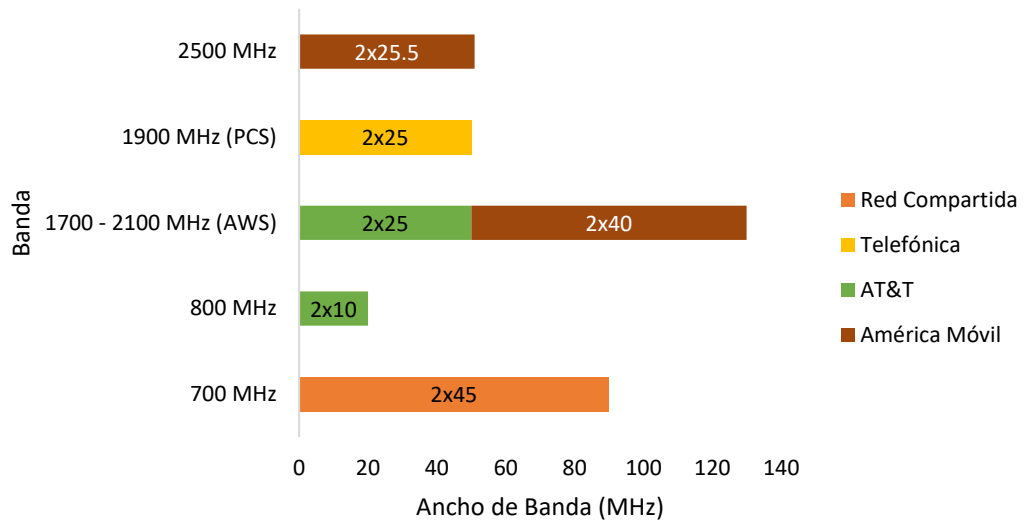
### 2.3.3 Evolución de la tecnología 4G

Esta tecnología proporciona acceso a Internet de banda ultra ancha para dispositivos móviles. Además, las altas tasas de transferencia de datos hacen que las redes 4G sean adecuadas para su uso en módems inalámbricos para computadoras portátiles (GSMarena, 2020). En México, la cobertura garantizada de la tecnología 4G aumentó más del doble, pasando de 40.6 por cada 100 habitantes en 2015 a 87.9 en 2018 a nivel nacional. En el 2017 el 58.5% del tráfico móvil por internet era en 4G, mientras que en el 2018 fue del 70.5%. Así mismo, la cobertura garantizada por la infraestructura en 4G de las redes de telecomunicaciones móviles en el 2017 era de 76.75 y en el 2018 de 87.92, teniendo un crecimiento de 14.57% con una tendencia a seguir aumentando. Por último, en el 2018 había 40,656 sitios celulares para la prestación del servicio de 4G en México (IFT, 2020d).

### 2.3.4 Distribución del espectro LTE

El espectro radioeléctrico es un recurso natural propiedad del estado, el cual puede ser arrendado por un periodo de tiempo definido. Así mismo, su disponibilidad o escasez influye grandemente en la composición del mercado (Álvarez, 2018). En la Figura 5 se puede observar la distribución del espectro LTE en México por operador. La distribución del espectro se obtuvo en base a lo reportado por el órgano regulador de telecomunicaciones en México (IFT, 2020e). En el siguiente capítulo se presenta un caso de estudio del pueblo mágico de Arteaga, Coahuila, en donde se comparan algunas medidas de desempeño entre los OMV y los OMR presentes en esa región.

**Figura 5** Distribución del espectro LTE en México



Fuente: Elaboración propia basado en (IFT, 2020e).

## Capítulo 3. Medidas de desempeño de las redes 4G en el Pueblo Mágico de Arteaga, Coahuila.

La conectividad móvil en el mercado Latinoamericano y el Caribe ha ido aumentando en los últimos 5 años. En el 2019, más de la mitad de la población se encontraba conectada a Internet a través de dispositivos móviles. Sin embargo, aún existen importantes barreras en la adopción de Internet móvil (Huidobro Moya, 2010). Por otro lado, en el 2013 la UNESCO definió el concepto de Universalidad de Internet, en donde se especifica el índice de conectividad móvil como uno de sus indicadores (Souter & Spuy, 2019)PUT. Debido a lo anterior, para esta investigación se decidió brindar información sobre algunos indicadores respecto al desempeño de las redes de cuarta generación (4G) en Operadores Móviles Virtuales (OMV) y en Operadores Móviles en Red (OMR) en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila. Cumpliendo así con uno de los objetivos de esta tesis.

En México, de acuerdo a OpenSignal (OpenSignal, 2020), la disponibilidad de la conexión Long-Term Evolution (LTE, por sus siglas en inglés) del operador 3 era del 84.1% de la población. Mientras que la cobertura del operador 1 y del operador 2 se estimó en alrededor de 80.5% y 74.1%, respectivamente. En contraste con Brasil o Chile, donde se alcanzaron tasas de penetración entre 135% y 155% de la población (IFT, 2020b) (OECD, 2017). Los OMV añaden valor tanto a los OMR como a los clientes. A los OMR les brinda la posibilidad de poder utilizar su capacidad excedente disponible; y a los clientes les permite disponer de servicios innovadores de valor agregado por nicho, que los OMR no pudieron ofrecer anteriormente (Son & Son, 2019). Se ha observado en varios países que la entrada de los OMV incrementa los niveles de competencia en el mercado de los operadores móviles al crear nuevos proveedores de servicios, ofrecer innovaciones que generan valor agregado y planes tarifarios más competitivos (Basaure et al., 2016). Los gobiernos de diferentes países han fomentado la entrada de los OMV en el mercado de las telecomunicaciones debido al rápido crecimiento de la demanda de Internet móvil y a la necesidad de aumentar

de manera eficiente la capacidad de la red inalámbrica para facilitar el cambio a nuevas tecnologías como las de quinta generación (5G) y la internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés) (Bauer, 2019) (Oughton, 2019).

El 76.6% de la población urbana mexicana es usuaria de internet (ENDUTIH, 2019). De acuerdo con el Cuarto Informe Trimestral Estadístico del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) (IFT, 2019a), la cuota de mercado de los principales OMR con respecto al número de líneas del operador 1 es de 69.9%, del operador 2 y del operador 3 de 11.3% y 17.1% respectivamente. Así mismo, los diecinueve OMV presentes en México, al 2019, constituyen el 2.1% de la cuota de mercado.

La problemática encontrada es la necesidad de los usuarios, de los órganos reguladores de telecomunicaciones y del gobierno mexicano por conocer el desempeño de los operadores móviles en distintas regiones del país. Aunado a lo anterior, la mayoría de la población solo tiene acceso a las velocidades de subida y de bajada de los datos en la red de los operadores móviles a través del uso de aplicaciones móviles gratuitas (Ávila, 2020). Para esta investigación se decidió utilizar los parámetros de la velocidad de subida, la velocidad de bajada, la latencia, la Potencia de Recepción de la Señal de Referencia (RSRP) y la Calidad Recibida de la Señal de Referencia (RSRQ) para conocer el desempeño de los operadores móviles.

En la literatura se encontró que la mayoría de los estudios realizados respecto a los Operadores Móviles (OM) se llevan a cabo utilizando bases de datos de instituciones públicas o privadas. Sin embargo, esto no es posible en el caso de la zona de Arteaga, Coahuila, ya que no se encontraron datos desagregados de acceso público que permitieran llevar a cabo la investigación. Khalifa et al., (2018) estudiaron un mercado móvil con dos OMR y un OMV a través de un enfoque teórico, en donde aplicaron la teoría de juegos para analizar la competencia del OMV. Para el desarrollo de la presente investigación se recolectaron datos en campo de tres de los principales OMR presentes en México y de diez OMVs identificados en la región de interés a través del

mapa de cobertura del IFT para analizar sus características. Ekanoye et al., (2018), identificaron los cuellos de botella experimentados por los operadores de redes móviles en el establecimiento de relaciones con OMVs en Nigeria. En México, los OMVs han tenido muy poca penetración de mercado, menor al 3% en los últimos años, de acuerdo con el último informe del IFT (IFT, 2018). Lotfi et al., (2017) investigaron, con una perspectiva económica, la interacción entre los OMR y los OMV. Así mismo, los incentivos que tienen los OMR para ofrecer algunos de sus recursos a los OMV. En esta investigación, dos operadores OMR comparten infraestructura con un OMV cada uno; los diecisiete OMVs restantes comparten infraestructura con el operador 2 de esta investigación (IFT, 2018).

Por otro lado, un Pueblo Mágico es una localidad que tiene atributos simbólicos, leyendas, historia, hechos trascendentes y vida cotidiana, lo que significa una oportunidad para el uso turístico. El Programa Pueblos Mágicos contribuye a revalorizar a un grupo de poblaciones del país (México) que representan alternativas nuevas y diferentes para los visitantes nacionales y extranjeros. En el año 2012, Arteaga fue nombrado Pueblo Mágico (SECTUR, 2017). Arteaga es una ciudad del estado mexicano de Coahuila, que forma parte del área metropolitana de Saltillo y es la capital del municipio del mismo nombre. Tiene 23,271 habitantes, es un área agrícola, especializada en la producción de manzana. Su área municipal cubre una gran cantidad de montañas boscosas, donde las temperaturas alcanzan los  $-15^{\circ}\text{C}$  (INEGI, 2018d). El municipio está ubicado al sureste del estado de Coahuila. Debido a su proximidad a Ramos Arizpe y Saltillo, el municipio es parte de una zona de conurbación de gran importancia en el estado (INEGI, 2018d). Se decidió llevar a cabo la investigación en el Pueblo Mágico de Arteaga, Coahuila, debido a la necesidad en la región de contar con un buen desempeño en los Operadores Móviles para poder ofrecer actividades relacionadas con el turismo. Así mismo, con el surgimiento de la Red Compartida Mayorista, el consorcio Altán Redes se comprometió a cubrir el 100% de los pueblos mágicos especificados en el Contrato de Asociación Público-Privada (PROMTEL, 2016); entre los cuales se encuentra Arteaga, Coahuila. Sustentando en

lo anterior, es pertinente preguntarse, ¿cuál es el desempeño de los operadores móviles que utilizan la red 4G en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila?

Uno de los objetivos de esta investigación es brindar información sobre algunos indicadores respecto al desempeño de las redes 4G en OMV y en OMR en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila. Para lograrlo, la oferta se midió a través de las variables de RSRP, RSRQ, velocidad de subida, velocidad de bajada y latencia en la región por medio de dos aplicaciones móviles (Network Cell Info y Speedcheck Pro) recorriendo una ruta a pie previamente planeada, sobre la periferia de la cabecera municipal del Pueblo Mágico de Arteaga, Coahuila. Debido a que en México inició la Fase 3 de contingencia del virus covid-19, la recolección de datos para esta investigación se tuvo que suspender. Para la recolección de los datos, se utilizaron trece diferentes tarjetas de Módulo de Identificación de Abonado (SIM, por sus siglas en inglés) de las cuales tres pertenecen a los principales OMR en el país y diez pertenecen a los OMV que tienen cobertura en la región de acuerdo con el mapa de cobertura garantizada del IFT y a la información proporcionada por los proveedores del servicio móvil. Se decidió realizar el estudio en el Pueblo Mágico de Arteaga Coahuila, debido a que, en el año 2019, esta región fue cubierta por el proyecto de Red Compartida Mayorista y por las características inherentes a los Pueblos Mágicos en México. Así mismo, por su ubicación geográfica, ya que forma parte de la zona conurbada de Saltillo. Además de que toma relevancia el conocer las condiciones actuales del mercado de los Operadores Móviles en zonas rurales en México para poder conocer sus características de desempeño. En la siguiente sección de este capítulo, se presentan los elementos relevantes detectados en la medición del desempeño de la calidad en el servicio móvil. En la siguiente sección se presentan los datos y variables utilizados en la investigación, y como fueron obtenidos. La tercera sección expone la metodología utilizada para conocer las características de desempeño de los OMR y los OMV en el Pueblo Mágico de Arteaga, Coahuila. En la cuarta sección se presentan los resultados de la investigación. Finalmente, se presenta la discusión generada por la investigación.

### 3.1 Elementos relevantes en la medición del desempeño de la calidad en el servicio móvil

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) define la calidad del servicio (QoS) como: “La totalidad de características de un servicio de telecomunicaciones que influyen en su capacidad para satisfacer las necesidades declaradas e implícitas del usuario del servicio” (ITU, 2017). Los parámetros utilizados para medir la calidad en el servicio móvil definidos por la ITU son la disponibilidad de la red, la accesibilidad de la red, la accesibilidad del servicio, la integridad del servicio y la retención del servicio; divididos en cuatro capas. Así mismo, define dos metodologías para medir la QoS: a través de medidas pasivas y a través de medidas activas. Las medidas pasivas, utilizan paquetes de datos y consiste en enviar los paquetes de prueba desde los sistemas de gestión, para medir durante su trayectoria el rendimiento, retraso, fluctuación de fase y pérdida de paquetes. La segunda metodología corresponde a las medidas activas, las cuales son sondas en forma de agentes de software o dispositivos de red. Estos se implementan en elementos de la red y en los dispositivos de los usuarios. Las mediciones proporcionan el estado del dispositivo en cualquier momento. Pueden ser instrumentos de medición dedicados, enrutadores dedicados a tareas de medición o enrutadores que admiten tráfico de datos y sondas de medición. La principal dificultad para este tipo de mediciones es que no son escalables para redes grandes. Para esta investigación, de las metodologías de evaluación de calidad propuestas en el ITU se decidió utilizar el modo no intrusivo, ya que permite medir el tráfico mientras es transportado por el canal, sin necesidad de señales de prueba activas y porque es realizado en tráfico real de clientes.

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) define la calidad en el servicio móvil como el efecto general del rendimiento de un servicio que determina el grado de satisfacción percibido por los usuarios y los niveles de calidad en el funcionamiento de una red. En otras palabras, la capacidad de una red, o parte de ella, para proporcionar las funciones relacionadas con la comunicación entre los

usuarios (OECD, 2017). En México, la cobertura del servicio móvil para el 2018, alcanzó tasas de penetración de alrededor del 53% de la población (INEGI, 2018c). Además, la calidad de servicio varía drásticamente entre áreas geográficas (OECD, 2017). Por lo que el IFT publicó en el Diario Oficial (Diario Oficial & IFT, 2018) el acuerdo en donde se establecen los índices y parámetros de calidad a los que deberán sujetarse los prestadores del servicio móvil (Tabla 2).

**Tabla 2** Indicadores de calidad de la red.

<b>Velocidad de carga/descarga</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Latencia</b>
<p>* Entendida como la velocidad promedio de subida y de bajada de la red, desagregada para cada operador en el mercado.</p> <p>* Medida en Megabites por segundo (Mbps).</p>	<p>* Muestra la proporción de tiempo en que los usuarios tienen disponible una conexión (por ejemplo, 4G) para su uso.</p> <p>* Medida en porcentaje (%)</p>	<p>* Es el tiempo que tarda en transmitirse un paquete a través de la red. En función de la conexión que se tenga, la latencia será mayor o menor. La latencia influye, por ejemplo, en el tiempo que tarda en cargar una web. Una conexión más rápida es signo de una red más receptiva.</p> <p>* Medida en milisegundos (ms).</p>

Fuente: Elaboración propia con datos de PROMTEL (2019)

En el 2018 el IFT publicó las especificaciones de calidad del servicio móvil. En ese documento se especifica que cada operador debe entregar al Instituto los mapas de cobertura garantizada y los mapas de cobertura diferenciada. Para cada tecnología se definieron tres rangos. Para la tecnología LTE, la variable de la Potencia de Recepción de la Señal de Referencia (RSRP), en el primer rango debe ser mayor a -100 dBm; en el segundo rango debe ser entre -111 y -100 dBm; y en el tercer rango debe tener los valores de -121 a -111 dBm. Las entidades federativas fueron clasificadas en cuatro estratos dependiendo del porcentaje de población, respecto a la población total del país. El primer estrato corresponde a una entidad federativa mayor a 0% y menor o igual a 2%. En el segundo estrato se encuentran las entidades federativas con un porcentaje de población mayor a 2% y menor o igual a 4%. En el tercer estrato las mayores a 4% y menores o igual a 6%. Finalmente, en el cuarto estrato se encuentran

las entidades federativas con una población mayor a 6% (Villa & Ewald, 2016). En el 2015, México tenía una población de 125.9 millones de habitantes y la entidad federativa de Coahuila, tenía una población de 2.955 millones, correspondiente al 2.34% de la población total del país (INEGI, 2018b). Lo anterior ubica a Coahuila en el segundo estrato. El IFT realizará ocho mediciones durante el año, de las cuales al menos una será de cada estrato de las treinta y una entidades federativas en México, para medir la calidad en el servicio móvil.

### 3.2 Datos y mediciones

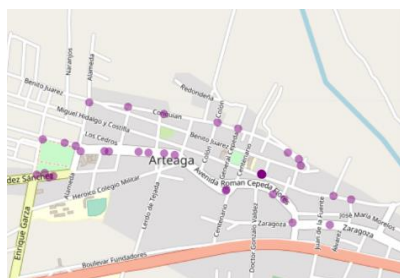
Para lograr uno de los objetivos de esta tesis, la oferta se midió a través de las variables de Calidad Recibida de la Señal de Referencia (RSRQ), Potencia de Recepción de la Señal de Referencia (RSRP), latencia, velocidad de subida y velocidad de bajada en la en centro de la cabecera municipal del municipio de Arteaga, Coahuila por medio de dos aplicaciones móviles: (1) Network Cell Info (Tabla 3) para medir la RSRQ y la RSRP. Se decidió medir la RSRQ y la RSRP debido a que son mediciones pasivas, es decir, no dependen de la ubicación física del servidor (Huidobro Moya, 2010). Así mismo, el análisis descriptivo se realizó únicamente sobre la tecnología LTE, lo cual delimito el número de OMVs, ya que algunos de ellos no soportaban esta tecnología. (2) La aplicación, Speedcheck Pro, se utilizó para medir la velocidad de subida, la velocidad de baja y la latencia de la red. Estas variables se utilizan para medir algunos parámetros de desempeño, de acuerdo con las características definidas en el órgano regulador de telecomunicaciones de México (IFT). Speedchek Pro opera principalmente sobre TCP y devuelve los siguientes parámetros (Overturf, 2019): (a) la latencia mide el tiempo que le toma al servido enviar una respuesta a la solicitud enviada del cliente (medida en milisegundos). La prueba se repite múltiples veces y el menor valor determina el resultado final. (b) La velocidad de bajada se define como cuando el cliente establece múltiples conexiones con el servidor a través del puerto 8080. El cliente le solicita al servidor un paquete de datos. Finalmente, (c) la velocidad de subida es cuando el cliente establece múltiples conexiones con el servidor a través del puerto definido y le envía un paquete de datos.

**Tabla 3** Variables relevantes de entrada de Network Cell Info

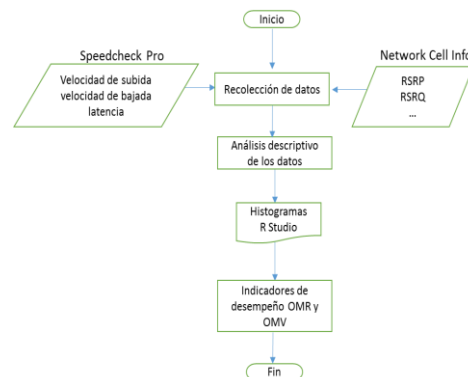
Variable	Definición
radiotype	tecnología utilizada por el operador (LTE, UMTS, GSM)
carrier	nombre del operador
fc	banda de frecuencia en MHz
signal	Potencia de Recepción de la Señal de Referencia (RSRP) en dBm
lat	latitud al momento de la medición
lon	longitud al momento de la medición
rsrq	Calidad Recibida de la Señal de Referencia (RSRQ) en dB
cellid	identificador de la estación base

Para medir la velocidad de la red se hicieron dos tipos de mediciones. La primera por la periferia de la cabecera de Arteaga y la segunda durante una hora en un punto fijo cercano al centro de la cabecera municipal del Pueblo Mágico (Figura 6). Con la aplicación Network Cell Info se realizaron mediciones caminando en un circuito cerrado por la periferia de la cabecera municipal de Arteaga. Se decidió medir durante una hora en un punto fijo para conocer el tráfico y la calidad de la red. La aplicación se programó de tal manera que recolectaba los datos cada tres minutos aproximadamente. Para las medidas en la periferia de la localidad, la aplicación de la velocidad (Speedcheck Pro) se ejecutó en el segundo plano, mientras que la aplicación de Network Cell Info se ejecutó en el primer plano del celular. Las dos aplicaciones se ejecutaron de forma simultánea en la recolección de datos en la periferia de Arteaga. El tratamiento de los datos se presenta en la Figura 7.

**Figura 6** Mapa de recolección de las medidas de velocidad del operador 1



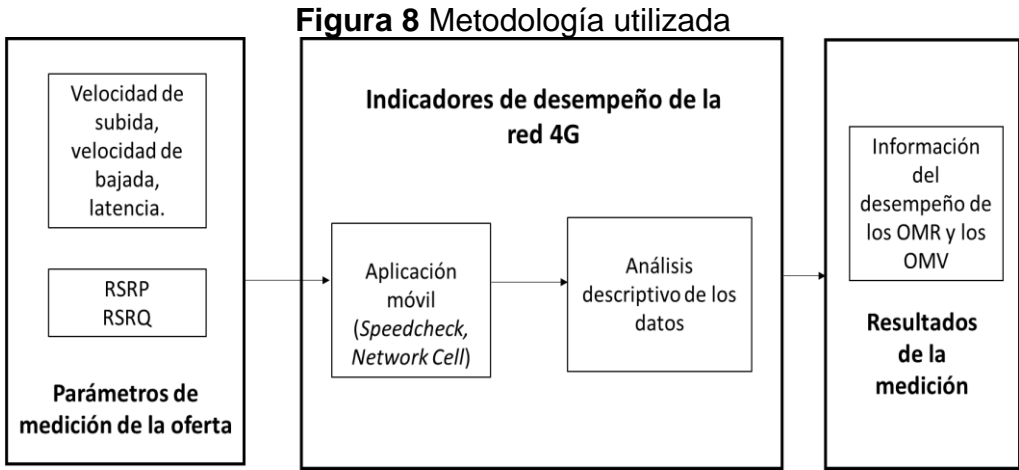
**Figura 7** Tratamiento de los datos.



Se realizaron mediciones en dos momentos. La primera en el periodo de diciembre a enero del 2019. La segunda en abril del 2020. Las mediciones realizadas durante el mes de abril se tenían planeadas hasta el mes de mayo, sin embargo, se tuvieron que suspender debido a que se entró a la fase 3 de la contingencia por el virus covid-19 en México.

### 3.3 Metodología

La metodología utilizada en la investigación se muestra en la Figura 8. Se consideraron diferentes instrumentos de recolección de datos, entre ellos destacan CalSpeed, OpenSignal y Network Cell Info. Siendo tres aplicaciones móviles que ofrecen diferentes tipos de datos. A continuación, se detalla cada una de ellas.



La primera aplicación considerada para la investigación fue CalSpeed (CalSPEED, 2019), lanzado por la Comisión de Servicios Públicos de California (CPUC), es una herramienta para medir la calidad y la velocidad de conexión a Internet. Realiza una prueba de dos fases que incluye la prueba inicial y la validación de los resultados. Prueba la velocidad de carga, velocidad de descarga, retardo del mensaje (latencia) y variación del retardo del mensaje (jitter). Se decidió descartar este instrumento, ya que el código abierto no permite hacer modificaciones a la zona geográfica de recolección

de los datos. La segunda aplicación considerada fue OpenSignal (OpenSignal, 2019), la cual realiza informes basados en mediciones de la experiencia real y el análisis científico. Es utilizada en proyectos de medición de red por organismos tales como el Organismo Promotor de Inversiones en Telecomunicaciones PROMTEL (PROMTEL, 2019) en México; sin embargo, los datos públicos se encuentran muy agregados. Por lo que las variables de interés para este proyecto no se encuentran disponibles de manera gratuita. Por último, se decidió utilizar la tercera aplicación, Network Cell Info para la recolección de datos debido a la gran cantidad de variables disponibles, las cuales son relevantes para la investigación, así mismo por su servicio de soporte y facilidad de uso.

Para el análisis de las observaciones recolectadas se utilizaron tres programas de software distintos. El primero de ellos es RStudio, a través del cual se mapeo la información utilizando la librería de leaflet. El segundo programa de software utilizado fue Stata, con el cual se realizó un análisis descriptivo de los datos. Finalmente, también se utilizó Spyder, para agrupar los diferentes archivos de datos recolectados y extraer las variables de interés para la investigación de los datos de entrada. Se recolectaron 7,748 observaciones de trece proveedores de servicio móvil en la zona de Arteaga Coahuila. Se utilizó una tarjeta SIM de cada proveedor de servicio móvil que opera en la zona. Los OMR medidos en la investigación son tres de los operadores principales presentes en el mercado mexicano; el resto de los operadores (10) son OMV (Tabla 4). Las medidas se tomaron recorriendo la periferia de la cabecera municipal de Arteaga, Coahuila; ejecutando la aplicación para la recolección de datos en tiempo real. La trayectoria en la periferia, haciendo el recorrido a pie tiene una duración aproximada de una hora. Las medidas de la velocidad recolectadas en un punto fijo se realizaron en un lapso de una hora aproximadamente. En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos en la investigación.

**Tabla 4** Observaciones recolectadas

<b>Operador</b>	<b>Network Cell Info</b>	<b>Speedcheck (LTE)</b>
Operador 3	749	27
OMV 1	795	61
OMV 4	472	40
OMV 3	492	27
OMV 6	365	39
OMV 7	687	32
OMV 8	211	24
OMV 5	448	26
OMV 9	391	17
OMV 10	680	35
OMV 2	252	31
Operador 1	1439	35
Operador 2	767	41
<b>TOTAL</b>	<b>7748</b>	<b>435</b>

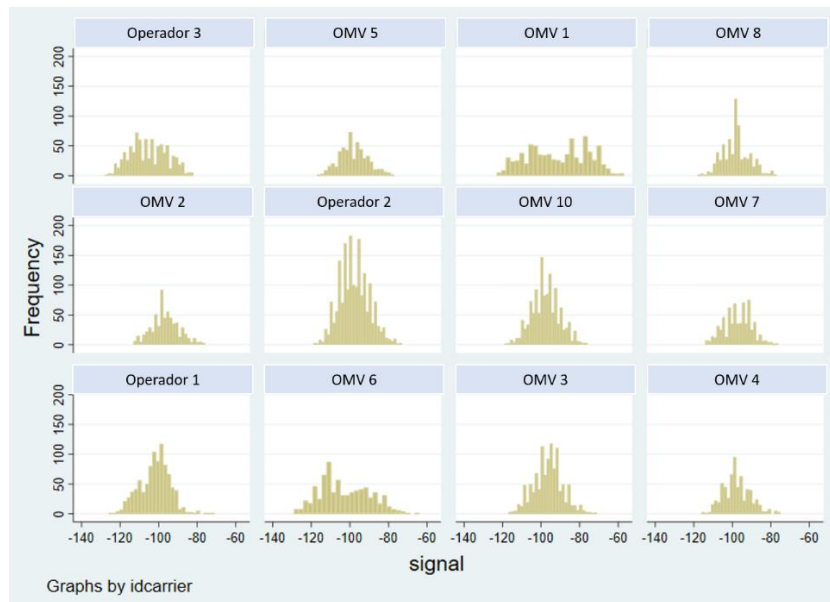
### 3.4 Análisis de resultados

En las mediciones de velocidad se obtuvieron 247 observaciones de trece operadores distintos realizadas en un punto fijo en el centro de la cabecera de Arteaga. Se obtuvieron 214 observaciones de trece operadores distintos realizadas en la periferia de la cabecera de Arteaga. En total se cuenta con 435 observaciones de trece operadores distintos, tres de los cuales son OMR. Los resultados muestran que ocho de los trece operadores tienen cero observaciones menores a 100ms de latencia. Los mejores resultados (Tabla 5), recolectados en los datos de esta investigación, en las distintas variables fueron del operador 3 con una mediana de latencia de 73 Mbps, el OMV 2 con una mediana en su velocidad de subida de 29.18 Mbps y el operador 1 con una mediana en su velocidad de bajada de 34.66 Mbps. Las variables recolectadas permiten conocer las tecnologías utilizadas por los operadores de acuerdo con su ubicación física. Así mismo, permiten observar la aproximación de la ubicación física de las diferentes estaciones base que utiliza cada operador.

En cuanto a los resultados de las mediciones de las variables de RSRP y RSRQ realizados con la aplicación Network Cell Info, se obtuvieron 7,748 observaciones de trece operadores distintos realizadas en la periferia de la cabecera de Arteaga, tres de

los cuales son OMR. En la Figura 9 se presenta el histograma de la variable RSRP por operador de las mediciones realizadas en abril del 2020.

**Figura 9** Histograma de mediciones de RSRP por operador



**Tabla 5** Comparativa del rendimiento de las variables de velocidad

**Mejor rendimiento**

Operador	Variable	Mediana de los datos recolectados
Operador 3	Latencia	73
OMV 2	Subida	29.18
Operador 1	Bajada	34.66

### 3.5 Conclusiones

Uno de los objetivos de esta investigación es brindar información sobre algunos indicadores del desempeño de las redes 4G de los OMR y los OMV en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila. Para lograr el objetivo, se midió la oferta a través de las variables de RSRP, RSRQ, latencia, velocidad de subida y velocidad de bajada en la

región por medio de dos aplicaciones móviles: Network Cell Info y Speedcheck Pro. De los datos recolectados se obtiene que todos los operadores comparten características similares de desempeño en la red 4G en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila. De los resultados obtenidos se puede inferir que no se encontraron diferencias significativas entre los OMV y los OMR. Por lo que es necesario continuar realizando este tipo de estudios. Como trabajo futuro se pueden realizar mayor cantidad de mediciones para poder detectar si existe alguna diferencia significativa entre los OMR y los OMV en la zona de Arteaga, Coahuila. Cabe mencionar que debido a que en México se entró en la Fase 3 de la contingencia, la recolección de datos a pie en la zona de interés se tuvo que suspender. Así mismo, se pueden comparar los resultados obtenidos con otros pueblos mágicos con características similares a las de Arteaga. Se espera que esta investigación pueda contribuir en brindar información a los usuarios finales y a los órganos reguladores respecto a las características de los operadores móviles disponibles en el mercado en la zona de Arteaga, Coahuila.

## Capítulo 4. Adopción de la Tecnología Móvil en México

Medir la adopción de tecnología móvil es un desafío debido a los altos costos involucrados. Además, hay una falta de datos disponibles públicamente sobre la demanda de tecnologías móviles a un nivel geográfico altamente desglosado. Sin embargo, los operadores móviles realizan grandes inversiones en el desarrollo de infraestructura, guiados por su demanda estimada. En este capítulo se propone una alternativa metodológica rentable. Este modelo permite inferir la adopción de tecnologías móviles utilizando datos de *crowdsourcing* basados en la infraestructura móvil a nivel geográfico desagregado. El ajuste del método propuesto es verificado mediante una correlación lineal entre la oferta y las variables de demanda real, cuando estén disponibles. Se puede observar una fuerte correlación entre las variables con coeficientes de correlación lineal que alcanzan 0.4522. Por lo tanto, sugerimos que los datos de *crowdsourcing* se pueden utilizar para inferir la adopción de tecnologías móviles a un nivel muy granular por área geográfica en otros países. En este capítulo se profundiza respecto a la adopción de la tecnología móvil. Para inferir la adopción de la tecnología móvil a partir de las variables de la oferta y la demanda. En las secciones siguientes se explica la metodología y los resultados obtenidos.

### 4.1 Definición de variables y mediciones

Para inferir la adopción de tecnología móvil en México, se realizó una correlación lineal entre la oferta y variables de demanda (Tabla 6). La variable de demanda utilizada en esta investigación es el número de personas que tienen un celular, recolectado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en los censos de población y vivienda de 2010 y 2020 a nivel municipal.

**Tabla 6** Variables principales

<b>Oferta</b>		<b>Demanda</b>	
<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>
celdas por km2	número de celdas dividido por área (m2 por municipio)	Tiene celular	número de personas con telefono celular por municipio

Por otro lado, las principales variables utilizadas en la investigación de la oferta son: i) el número de nodo (eNB ID), ii) el código de celda (Cell ID), iii) el área en m2 de la superficie del municipio, iv) el año en el que se realizó la medición, y v) el número de nodos y células por área geográfica. La celda es globalmente identificada en la red de telecomunicaciones por el ECI (E-UTRAN Cell Identity), que es un código de 28 bits. Los 20 bits más significativos identifican el nodo (eNB ID) y los 8 bits menos significativos identifican el código de celda de ese nodo (ID de celda).

Asimismo, las variables de oferta fueron filtradas por operador. Fueron obtenidos a partir de datos de crowdsourcing de las bases de datos MLS y OpenCellID. La información de ambas bases de datos se unificó en un solo archivo utilizando Stata y filtrado por país (MCC = 334), dejando un total de 795,162 observaciones con una fecha de corte del 13 de marzo del 2021. Posteriormente fue filtrado por tecnología LTE, dejando 189,372 observaciones. Finalmente, fue filtrado por ubicación geográfica, resultando en 189,367 observaciones. Se analizó la información de 33,031 nodos de los cuatro principales operadores de redes móviles presentes en México. Según el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT, 2020) en México, hay 40,656 celulares (nodos) que usan tecnología 4G.

Se decidió analizar los datos a nivel municipal porque en México existe una gran disparidad territorial. Además, la información necesaria está disponible públicamente para realizar el análisis a este nivel geográfico y cumplir uno de los objetivos de esta tesis. Así mismo, esta clasificación permite mapear y visualizar los datos más claramente que si se hace a un nivel más granular, como Áreas Geoestadísticas

Básicas (AGEB), bloques o localidades. Una limitante de la investigación es que no se encontró información disponible públicamente con respecto a alguna de las variables relevantes para el estudio a niveles geográficos más granulares, principalmente en las variables de demanda. Otra limitante es la disponibilidad de archivos *shapefile*, que permiten mapear información. Esto es porque los archivos que se encontraron, al mapearlos usando Stata y R Studio, mostraron algunas anomalías. El procesamiento de los datos se presenta a continuación.

## 4.2 Procesamiento de los datos

Para definir la correspondencia entre las celdas y las frecuencias por operador se utilizó el servicio público Cellmapper, el cual contiene el E-UTRAN Cell Identifier (ECI) y la banda de frecuencia de cada celda conocida. Se revisó manualmente una cantidad suficientemente considerable de celdas para cada OMR, lo cual permitió inferir las reglas de asignación. Por otro lado, para definir la cantidad de nodos y celdas por área geográfica, primero se realizó un *merge* entre los datos *crowdsourced* y la información geográfica disponible en un *shapefile*. Posteriormente, se contaron la cantidad de nodos y celdas que se encontraban dentro de cada área geográfica utilizando la función *geoinpoly* de Stata. Finalmente, se realizó un *merge* con la variable disponible de la demanda a nivel geográfico para poder realizar la correlación entre las variables de la oferta y las variables de la demanda.

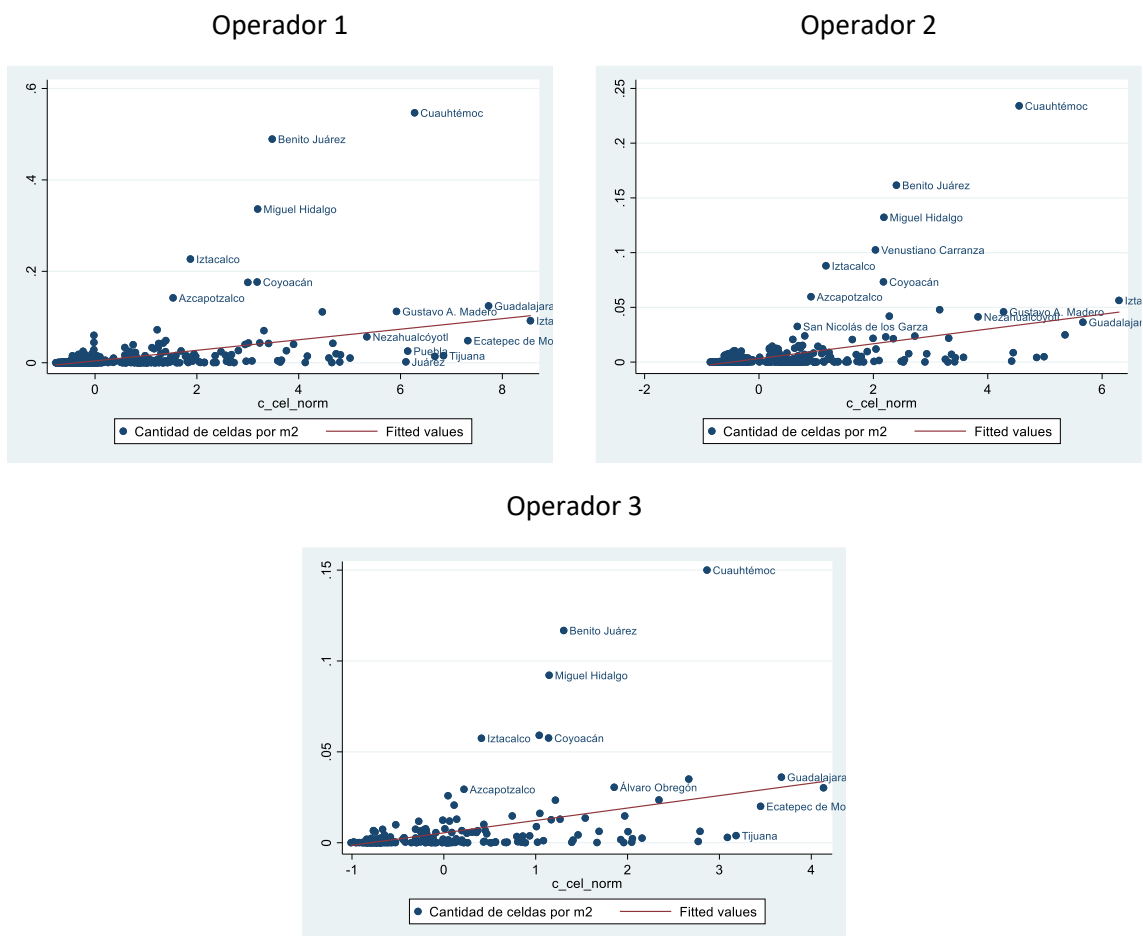
Así mismo, se realizó un análisis del sesgo de los datos por comparación con las fuentes oficiales. Se encontró que en el reporte del Comportamiento de los Indicadores de los Mercados Regulados (2020b) del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), el cuál es el órgano regulador en México, había 40,656 sitios celulares con la tecnología 4G durante el año 2019. Por otro lado, se encontró que el operador 1 en el 2019 tenía 15,953 nodos pertenecientes a la compañía Telesites (Bnamericas, 2020). También, que en octubre del 2020 el operador 4 contaba con 5,200 torres (Altan Redes, 2020). La información anterior se utilizó para calcular la cantidad de los nodos

de los operadores 2 y 3. Restando del total de nodos con la tecnología 4G reportados por el IFT los nodos de los operadores 1 y 4. Posteriormente, en base a la participación del mercado de cada operador, se calculó la cantidad de nodos por cada uno de los operadores. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en esta investigación.

### 4.3 Resultados

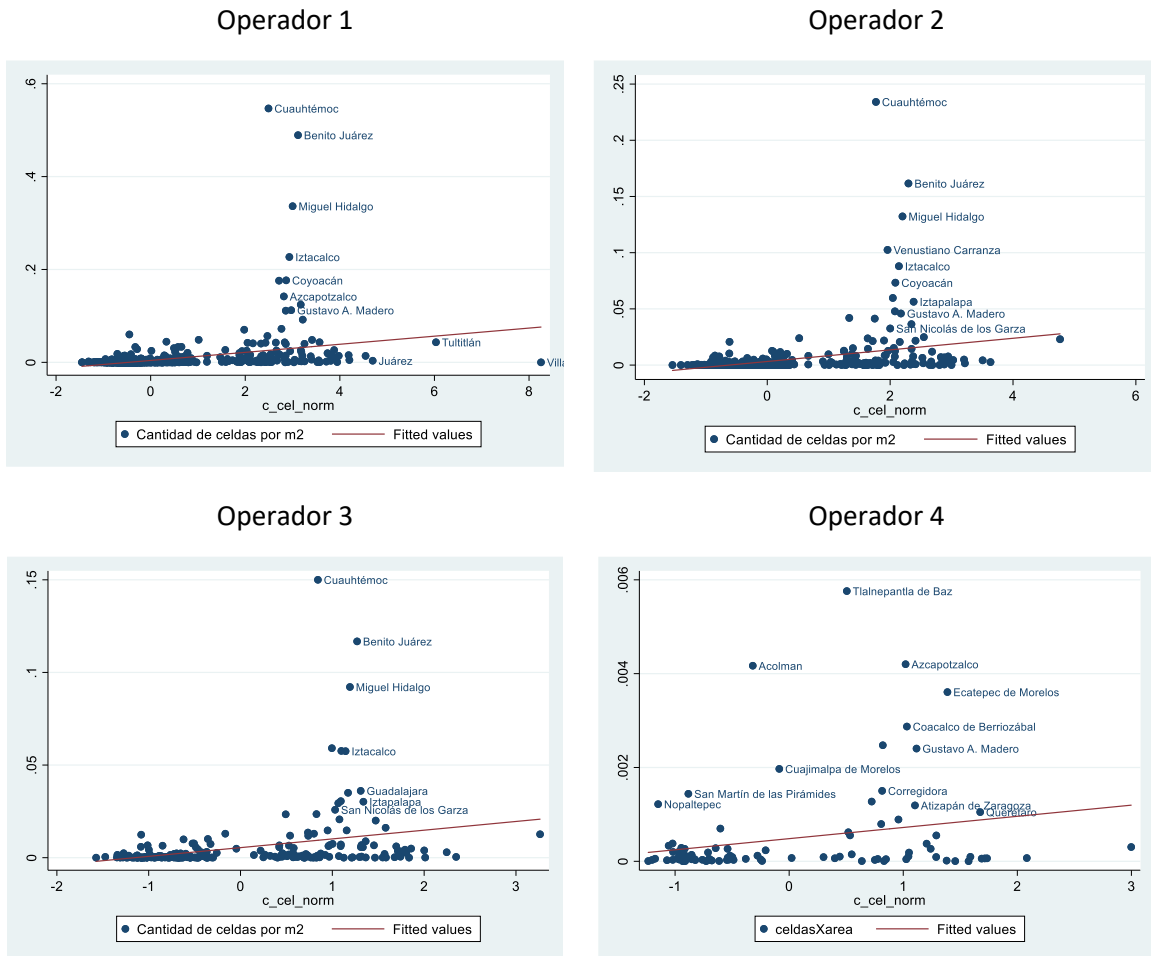
Como se mencionó en el apartado de definición de datos y variables, las variables de demanda utilizadas se obtuvieron de Censos de Población y Vivienda del INEGI para los años 2010 y 2020. El censo se realiza cada 10 años. La variable es binaria, responde a la pregunta: ¿tienes celular? Para cada municipio de México el Se contó el número de personas que respondieron afirmativamente. Posteriormente, una correlación lineal por operador se realizó entre la variable de demanda y las variables de oferta. Las variables de oferta se obtuvieron de los datos de crowdsourcing. La variable que se correlacionó es el número de celdas por metro cuadrado por municipio. Los resultados correspondientes al censo de 2010 se presentan en la Figura 10 y los del censo de 2020 son que se presenta en la Figura 11. El operador 4 fue excluido de la correlación del censo de 2010 desde que el operador 4 comenzó operaciones en 2017. La variable número de personas con teléfono celular ( $x$ ) se estandarizó con la fórmula  $x' = \frac{x-m}{sd}$  donde  $m = mean$  y  $sd = desviación\ estándar$ .

**Figura 10** Correlación lineal de la cantidad de personas con teléfono celular(X) del censo 2010 y la cantidad de celdas por m<sup>2</sup> (Y) por municipio por operador en México.



Fuente: Elaboración propia utilizando Stata.

**Figura 11** Correlación lineal de la cantidad de personas con teléfono celular(X) del censo 2020 y la cantidad de celdas por m<sup>2</sup> (Y) por municipio por operador en México.



Fuente: Elaboración propia utilizando Stata.

En todos los casos se puede observar una correlación lineal positiva entre la variable de la demanda y la variable de la oferta. De los resultados obtenidos se puede concluir que existe una correlación positiva entre la variable de la oferta, cantidad de celdas por metro cuadrado por municipio y la variable de la demanda, cantidad de personas con teléfono celular por municipio.

## 4.4 Conclusiones

En este capítulo de la tesis se propuso un modelo metodológico innovador que permite analizar la adopción de las tecnologías móviles. Estudiando como la evolución de la oferta se relaciona con la evolución de la demanda, utilizando datos *crowdsourced* para la variable de la oferta. El modelo se probó al analizar el nivel de adopción de la tecnología móvil en México. Para lograrlo, se utilizaron grandes cantidades de datos *crowdsourced* de MLS y OpenCellid desde el año 2013 al 2020. El método propuesto en esta investigación ha sido utilizado anteriormente por Frias et al. (2020) para el análisis de los operadores en Londres.

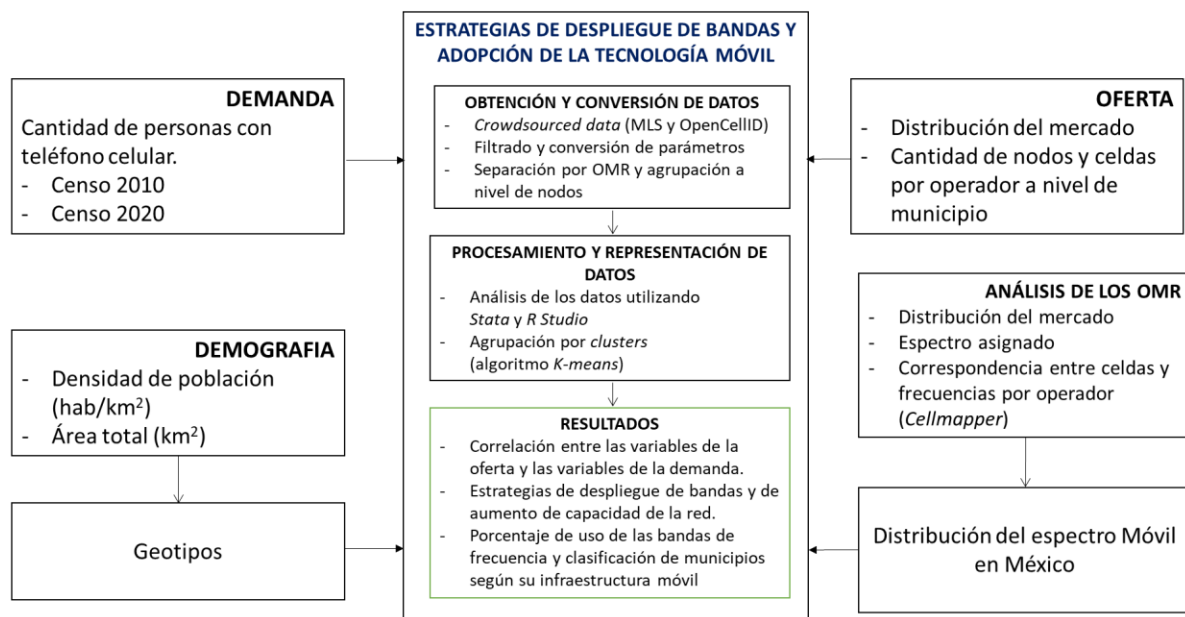
De esta investigación se puede concluir que existe una correlación lineal positiva entre la variable de adopción desde la demanda, cantidad de personas con teléfono celular a nivel municipal y la variable de la oferta, cantidad de celdas por área. Así mismo, se probó que el modelo metodológico puede ser utilizado para inferir el nivel de adopción de la tecnología móvil por área geográfica a partir de datos *crowdsourced*.

Como trabajo futuro se sugiere aplicar el modelo metodológico propuesto para el análisis de la adopción de la tecnología móvil en otras áreas geográficas. Una de las limitaciones del modelo es que depende de la disponibilidad de datos granulares a nivel geográfico para las variables de la demanda. Finalmente, se sugiere desarrollar técnicas más avanzadas de análisis de datos a partir de los datos disponibles de *crowdsourced* de los operadores móviles. Estos pueden ser utilizados en otro tipo de estudios como en la planeación y simulación de redes móviles. Se espera que esta investigación pueda contribuir en brindar información a los usuarios finales, a los órganos reguladores y a los operadores móviles respecto al nivel de adopción de la tecnología móvil por área geográfica desde la oferta y la demanda.

## Capítulo 5. Caracterización de la estructura de la red móvil LTE

En este capítulo, se presenta una metodología que permite dar respuesta a las preguntas de investigación presentadas en el primer capítulo de este documento. En la Figura 12 se presenta un diagrama que describe el proceso seguido a partir de los datos *crowdsourced* para analizar a los operadores en México. La densidad de los nodos a partir de los datos *crowdsourced* fue obtenida siguiendo el procedimiento propuesto por Frías et al. (2020), el cual se basa en las áreas geográficas, la frecuencia del espectro y las medidas recolectadas. A continuación, se presentan las variables utilizadas. Posteriormente, las áreas geográficas de estudio denominadas “geotipos” y sus características. Finalmente, se presenta el procesamiento de los datos para calcular la densidad de los nodos en su respectiva frecuencia.

**Figura 12** Metodología utilizada en la investigación



Fuente: Elaboración propia basada en la metodología de Frías et al. (2020)

## 5.1 Definición de variables y mediciones

Las variables principales utilizadas en la investigación son: el número de nodo (eNB ID), el código de celda (Cell ID), el área en Km<sup>2</sup> de la superficie del municipio, el año en que fue realizada la medición, el número de nodos por municipio y la densidad espacial en nodos/Km<sup>2</sup>. La celda se identifica de manera global en la red de telecomunicaciones mediante el ECI (E-UTRAN Cell Identity), el cual es un código de 28 bits. Los 20 bits más significativos identifican el nodo (eNB ID) y los 8 bits menos significativos identifican el código de celda de ese nodo (Cell ID).

Para esta investigación, se utilizaron datos *crowdsourced* de *OpenCellID* y de Mozilla MLS. Se unificó la información de ambas bases de datos en un solo archivo utilizando Stata y se filtró por país (mcc = 334) quedando un total de 873,194 observaciones con fecha de corte del 23 de septiembre del 2020. Posteriormente se filtró por tecnología LTE, quedando 226,149 observaciones. Finalmente, se filtró por ubicación geográfica resultando 223,678 observaciones. Se analizó la información de 34,835 nodos de cuatro operadores móviles en red presentes en México. De acuerdo al IFT (2020) en México hay 40,656 sitios celulares (nodos) que utilizan la tecnología 4G.

Se decidió clasificar los datos a nivel de municipio debido a que en México existe una total disparidad territorial, además se cuenta con la información necesaria para poder realizar el análisis a este nivel y cumplir el objetivo de la investigación. Así mismo, esta clasificación permite mapear los datos y visualizarlos más claramente que si se realiza a un nivel más granular como Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBs), manzanas o localidades. Una limitante de la investigación es que no se encontró información disponible públicamente respecto a alguna de las variables relevantes para el estudio, como superficie territorial o densidad de población, en algunos de los niveles más granulares. Otra limitante es la disponibilidad de los archivos *shapefile* los cuales permiten mapear la información. Lo anterior debido a que los archivos que se encontraron, al mapearlos usando Stata y R Studio mostraban algunas anomalías. A

continuación, se describe la clasificación a nivel de municipios por medio de geotipos y sus características.

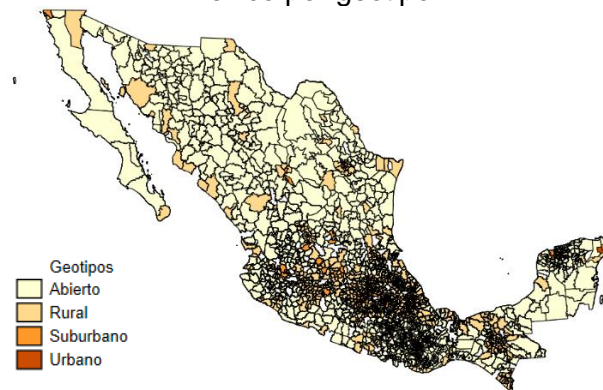
## 5.2 Geotipos

Un geotipo es una agrupación de áreas que tienen características sociodemográficas similares; tales como urbano, suburbano, rural o abierto. Para esta investigación, los geotipos se clasificaron de acuerdo con la densidad de población de los municipios en México (Tabla 7). En la Figura 13 se muestra la clasificación de los municipios por geotipo que se utilizó en esta investigación.

**Tabla 7** Geotipos

Geotipo	Descripción	Municipios	Densidad de población (hab/Km <sup>2</sup> )
1	Urbano	22	5,000 a 16,898.18
2	Suburbano	174	500 a 4,999
3	Rural	1,023	50 a 499
4	Abierto	1,152	0 a 49

**Figura 13** Clasificación de los municipios de México por geotipo.



Fuente: Elaboración propia.

## 5.3 Procesamiento de los datos

Para definir la correspondencia entre las celdas y las frecuencias por operador se utilizó el servicio público *Cellmapper*, el cual contiene el E-UTRAN *Cell Identifier* (ECI) y la banda de frecuencia de cada celda conocida. Se revisó manualmente una cantidad suficientemente considerable de celdas para cada OMR, lo cual permitió inferir las reglas de asignación. Por otro lado, para definir la densidad espacial, primero se calculó la cantidad de nodos por municipio utilizando *Stata*. Se realizó un *merge* entre los datos crowdsourced, la información de los municipios de las bases de datos de INEGI y la información geográfica de los municipios disponible en un *shapefile* para su posterior mapeo en *RStudio*. Posteriormente, se contaron los nodos que se

encontraban dentro de cada municipio utilizando la función `geoinpoly` de Stata. Finalmente, se dividió la cantidad de nodos por municipio entre el área de la superficie del municipio en Km<sup>2</sup> dando como resultado la densidad espacial en nodos/Km<sup>2</sup> (ver anexo 1).

Así mismo, se realizó un análisis del sesgo de los datos por comparación con las fuentes oficiales. Se encontró que en el reporte del Comportamiento de los Indicadores de los Mercados Regulados (2020b) del Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT), el cuál es el órgano regulador en México, había 40,656 sitios celulares con la tecnología 4G durante el año 2019. Por otro lado, se encontró que el operador 1 en el 2019 tenía 15,953 nodos pertenecientes a la compañía Telesites (Bnamericas, 2020b). También, que en octubre del 2020 el operador 4 contaba con 5,200 torres (Altan Redes, 2020). La información anterior se utilizó para calcular la cantidad de los nodos de los operadores 2 y 3. Restando del total de nodos con la tecnología 4G reportados por el IFT los nodos de los operadores 1 y 4. Posteriormente, en base a la participación del mercado de cada operador, se calculó la cantidad de nodos por cada uno de los operadores. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en esta investigación.

## Capítulo 6. Resultados

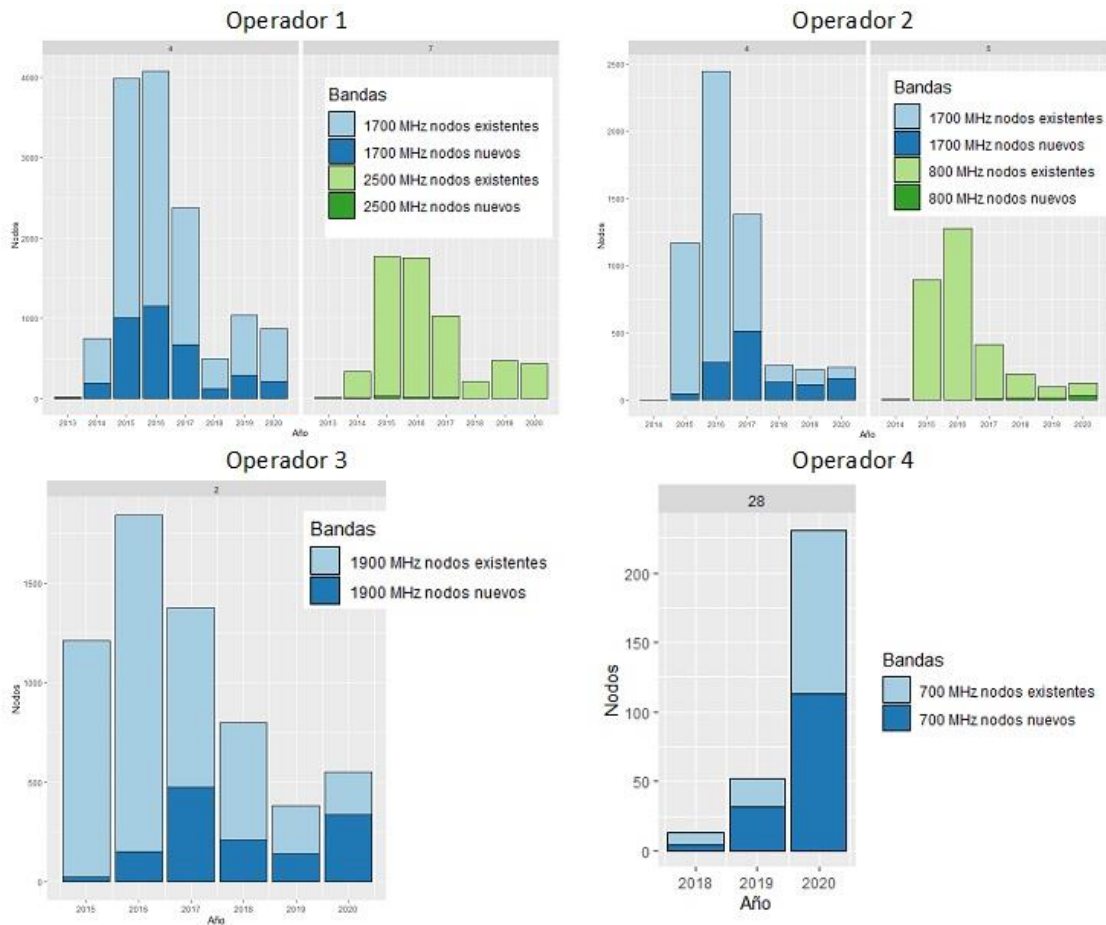
Históricamente, el aumento de capacidad de las redes móviles ha sido abordado por los operadores a través de tres técnicas de expansión de la red. La primera es mediante la construcción de más sitios celulares (densificación de la red). La segunda, es aumentando el espectro disponible para servicios móviles. Y la tercera, usando tecnologías más avanzadas con mayor eficiencia espectral. Para dar respuesta a la pregunta de investigación los resultados se dividieron en cuatro bloques: (a) estrategias de despliegue de las bandas, (b) estrategias de aumento de capacidad de la red, (c) porcentaje de uso de las bandas de frecuencia y (d) clasificación de municipios según su infraestructura móvil. Para cada bloque se realizó un análisis por operador, es decir, los datos crowdsourced se filtraron por operador para su análisis. Posteriormente los resultados obtenidos fueron comparados entre los distintos operadores.

### 6.1 Estrategias de despliegue de bandas

Los operadores de telecomunicaciones móviles utilizan dos estrategias principalmente para el despliegue de infraestructura. La primera es desplegar un nodo nuevo con la banda de frecuencia. Y la segunda es integrar el espectro en un nodo existente. En esta investigación se analizaron las estrategias utilizadas por los operadores en México. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Las estrategias de despliegue por bandas de frecuencia de los cuatro OMR principales en México se muestran en la Figura 14. El operador 1 utiliza las bandas de frecuencia de 2500 MHz y la banda AWS (1700 MHz – 2100 MHz). El operador 2 utiliza las bandas de frecuencia de 800 MHz y la banda AWS. El operador 3 utiliza la banda PCS que corresponde a los 1900 MHz. Finalmente, el operador 4 utiliza la banda de 700 MHz.

**Figura 14** Estrategias de despliegue de los operadores por banda de frecuencia.



Fuente: Elaboración propia.

El operador 1 es el que tiene mayor cobertura en México. Posee 2x40 MHz en la banda AWS y 2x25.5 MHz en la banda de 2500 MHz. Es el operador con mayor antigüedad en México. De los datos crowdsourced se pudieron obtener mediciones de los nodos desde el 2013. En la mayoría de los casos, reutiliza la infraestructura con la que cuenta para desplegar nuevas portadoras en nodos que existían previamente. En los años 2015, 2016 y 2017 es cuando utiliza mayor cantidad de nodos nuevos en la banda AWS.

La banda AWS es compartida por el operador 1 y 2. El operador 2 cuenta con 2x25 MHz en la banda AWS y con 2x10 MHz en la banda de 800 MHz. Al igual que el operador 1, despliega mayor cantidad de portadoras en nodos existentes, reutilizando de esta manera la infraestructura previamente desplegada. En el año 2017 es cuando utiliza mayor cantidad de nodos nuevos en la banda AWS.

El operador 3 tiene asignados 2x25 MHz en la banda PCS. Al igual que el operador 2, en el año 2017 es cuando utilizó mayor cantidad de nodos nuevos. Así mismo, utiliza en su mayoría nodos existentes. Para esta investigación, si un operador despliega más de una portadora en un mismo nodo, se considera que la primera portadora utiliza un nodo nuevo y la segunda o tercera reutilizan esa base.

Finalmente, el operador 4 tiene asignados 2x45 MHz en la banda de 700 MHz. A través de una Asociación Público-Privada (APP) se comprometió a cubrir el 92.2% de la población en el año 2024. Inició sus operaciones en el año 2017. Debido a lo anterior, los datos del crowdsourced para este operador inician a partir del año 2018. Para el año 2020, utiliza 113 nodos nuevos y 118 nodos existentes.

## 6.2 Estrategias de aumento de capacidad de la red

A continuación, se presenta el análisis de la evolución temporal del aumento de capacidad de la red de los operadores en México a través del mapeo de la densificación de la red por operador. En las Figuras 15 a 18 se puede observar la densificación de la red de cada operador a través de los años. En la parte superior se muestra la densificación de la red por municipio en el país y en la parte inferior se muestra la densificación de la red en la región del centro del país (Ciudad de México [CDMX] y alrededores). Se utilizó una escala logarítmica en el color de los mapas para facilitar la visualización de los datos.

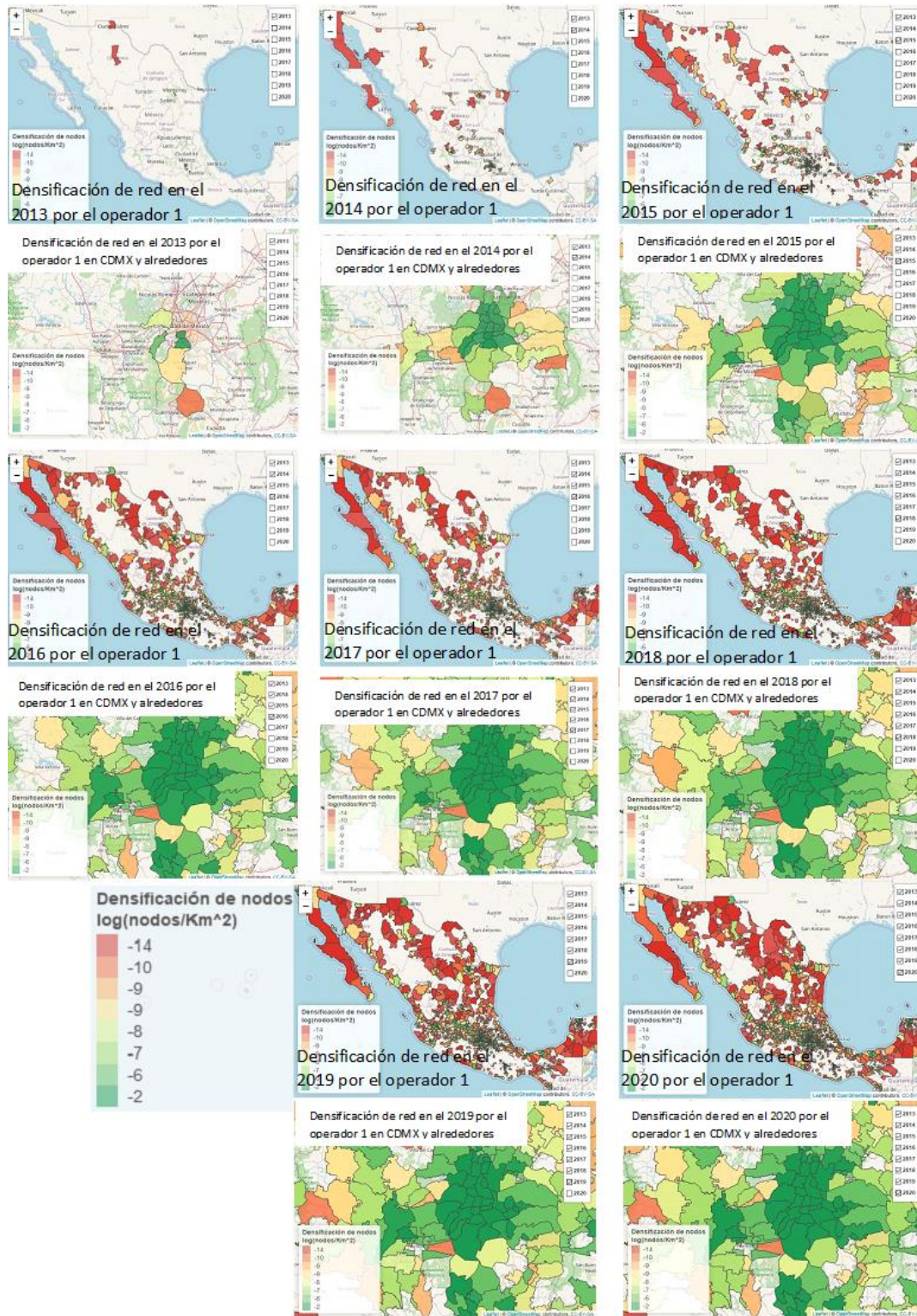
La densificación de la red (o densificación espacial) se mide en nodos/km<sup>2</sup>. Los valores más pequeños corresponden a los municipios con mayor extensión territorial y/o con

menor cantidad de nodos. Los valores más altos corresponden a los municipios, por lo general en la parte central de México, que tienen un área territorial menor y mayor cantidad de nodos.

Del análisis de la evolución temporal de los datos, se encontró que el operador 1 comienza desplegando las estaciones base en la parte central del país y en algunos municipios de la frontera con Estados Unidos (Figura 15). Posteriormente continúa con la densificación espacial de los núcleos urbanos como Guadalajara y Monterrey. Finalmente logra una gran cobertura del territorio mexicano aumentando progresivamente la densidad de los nodos, teniendo en el centro del país los municipios con mayor densidad espacial.

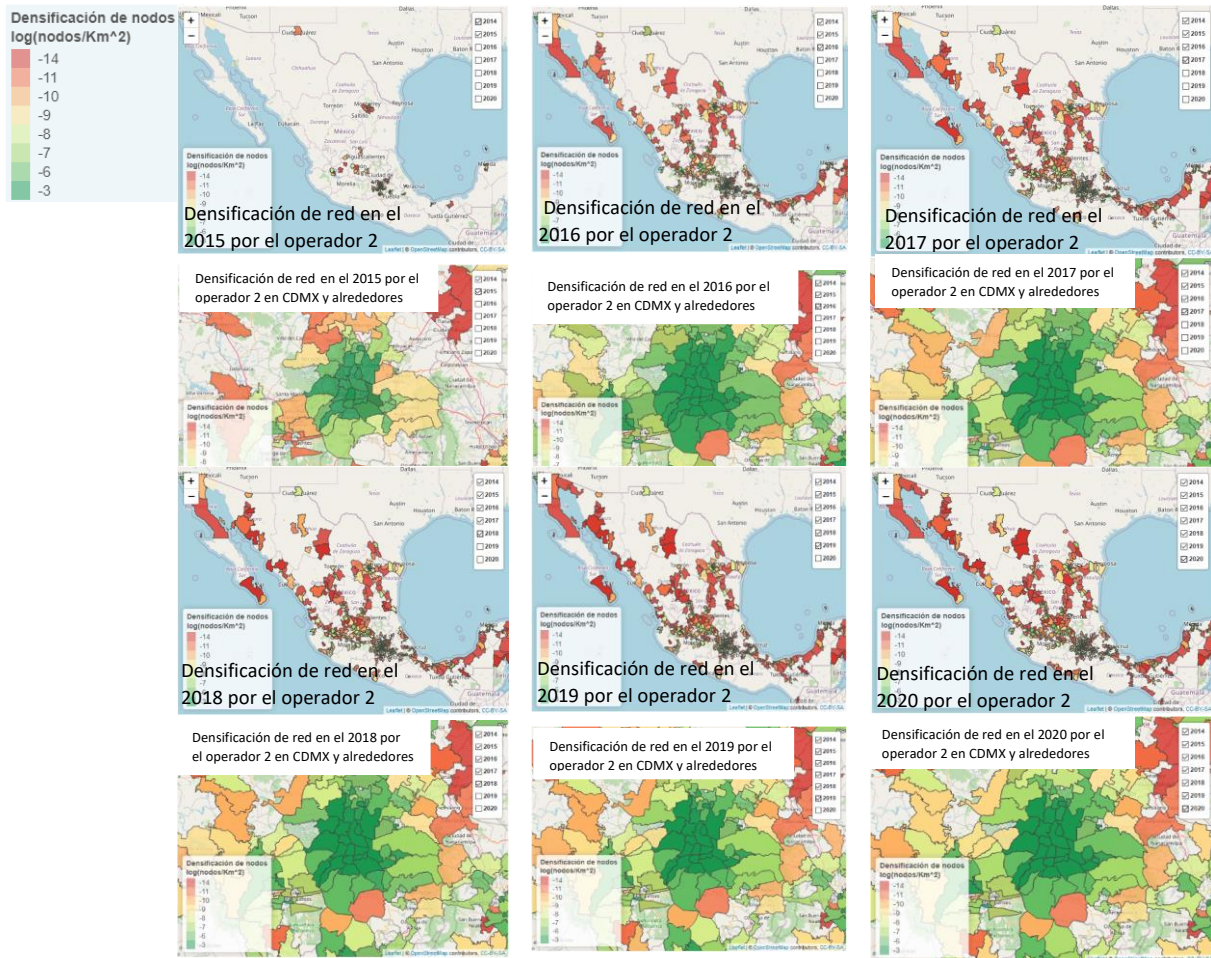
El operador 2, al igual que el operador 1, inicia el despliegue de nodos en la parte central del país (Figura 16). Posteriormente densifica los núcleos urbanos. Tiene una cantidad menor de nodos que el operador 1, lo cual se puede ver reflejado en el mapeo de los datos. Se puede apreciar un gran salto en cobertura entre el 2015 y el 2016. Lo anterior debido a un acuerdo de cobertura (*roaming* nacional) entre el operador 1 y el operador 2. El operador 1 presta su infraestructura al operador 2 en donde no cuente con infraestructura propio o se encuentre construyendo su infraestructura. Así mismo, el operador 2 tiene un convenio de arrendamiento con el operador 3. El IFT aprobó el convenio permitiendo al operador 3 arrendar infraestructura del operador 2.

**Figura 15** Densificación de la red del operador 1



Fuente: elaboración propia

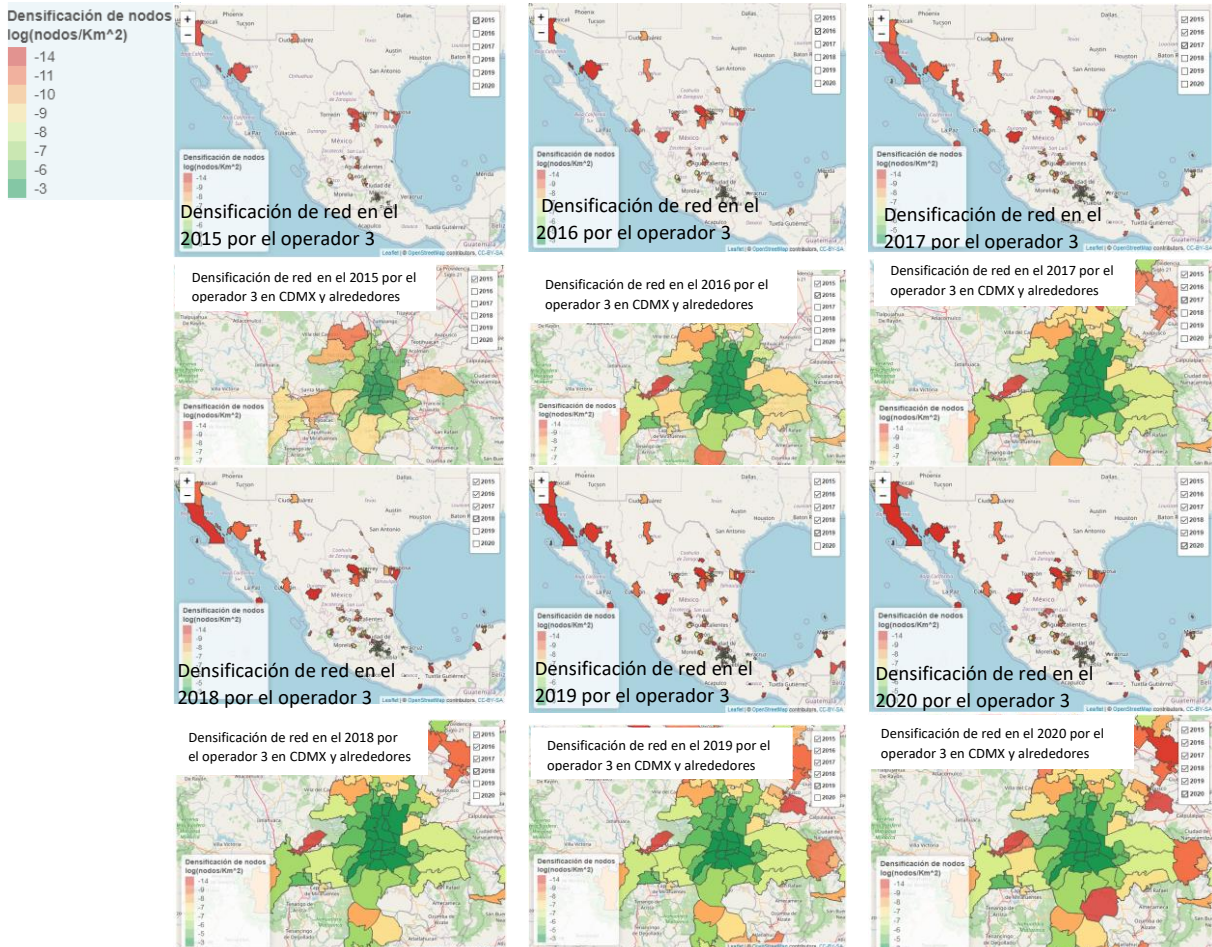
**Figura 16** Densificación de la red del operador 2



Fuente: Elaboración propia

Aunado a lo anterior, el operador 3 tiene menor cantidad de nodos que el operador 2, lo cual se puede ver reflejado en el mapeo de la densidad de los nodos (Figura 17). Al igual que los dos operadores anteriores, tiene mayor densificación de nodos en la parte central del país (Ciudad de México) y en los núcleos urbanos como Monterrey y Guadalajara. A diferencia de los dos operadores anteriores, tiene una menor cobertura en el territorio mexicano.

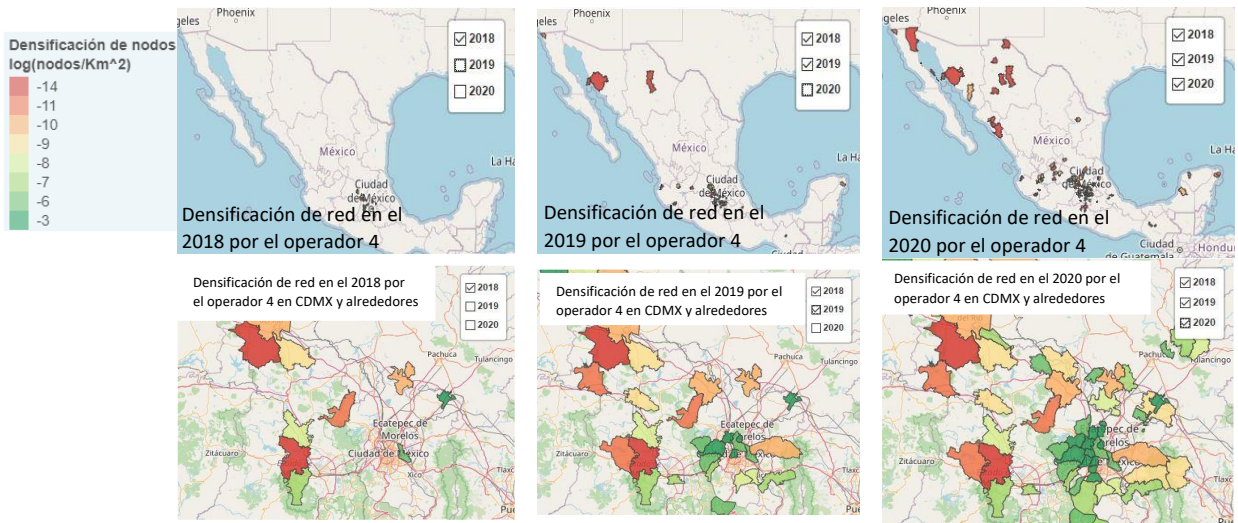
**Figura 17** Densificación de la red del operador 3



Fuente: Elaboración propia

Por último, el operador 4 tiene la mayor densificación de nodos en la parte central de país, posteriormente densifica la ciudad de Guadalajara (Figura 18). Es el operador más reciente, contando con datos *crowdsourced* del 2018, 2019 y 2020. En esos tres años se puede observar un avance progresivo en el aumento de la densificación de nodos hacia las zonas urbanas.

**Figura 18** Densificación de la red del operador 4



Fuente: Elaboración propia

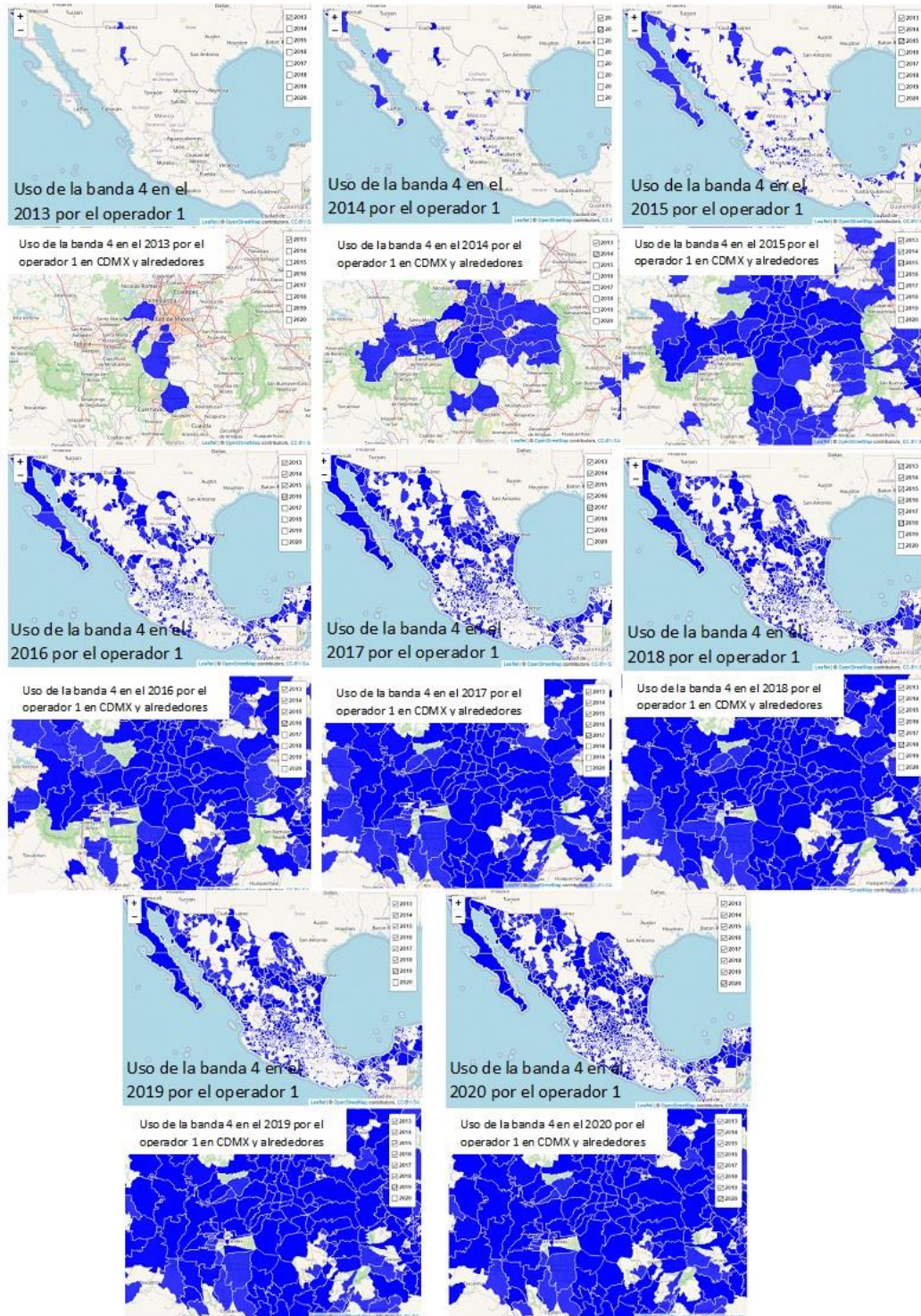
### 6.3 Porcentaje de uso de las bandas de frecuencia

A continuación, se presentan los resultados respecto al uso que le da cada operador móvil a las bandas de frecuencia que tiene asignadas. El operador 1 utiliza en mayor medida la banda de 2500 MHz que la banda de 1700 MHz (AWS). Así mismo, en los datos analizados del año 2020, se encontró que 78 municipios están cubiertos únicamente por la banda de 1700 MHz, en contraste con 240 municipios que se encuentra cubiertos únicamente por la banda de 2500 MHz, mientras que 47 municipios se encuentran cubiertos por ambas bandas (1700 MHz y 2500 MHz). De lo anterior se puede concluir que el operador 1 utiliza en mayor cantidad de municipios la banda alta (2500 MHz) que la banda baja (1700 MHz), a pesar de que la banda baja tiene mejores características de propagación. Por otro lado, el porcentaje de uso de ambas bandas aumentó considerablemente en los años 2015 y 2016. En las Figuras 19 a 24 se muestra el uso que los operadores hacen de las bandas que tienen asignadas a través de los años. En la parte superior se muestra el mapa del uso de las bandas en el país y en la parte inferior se muestra un mapa de la región del centro del país (Ciudad de México [CDMX] y alrededores).

Por su parte, el operador 2 utiliza la banda de 800 MHz y la banda de 1700 MHz (AWS). A través de los años, el porcentaje de uso de la banda de 800 MHz ha sido menor que el de la banda de 1700 MHz. Para el año 2020 se encontró que 57 municipios se encontraban cubiertos únicamente por la banda de 800 MHz. En comparación con 93 municipios que se encontraban cubiertos únicamente por la banda de 1700 MHz, mientras que 32 municipios se encontraban cubiertos por ambas bandas (800 MHz y 1700 MHz). De lo anterior se puede concluir que el operador 2, al igual que el operador 1, utiliza en mayor cantidad de municipios la banda alta (1700 MHz) que la banda baja (800 MHz), a pesar de que la banda baja tiene mejores características de propagación. En el mapeo del despliegue de las bandas se puede observar que la banda de 800 MHz es utilizada principalmente en las zonas urbanas mayormente pobladas.

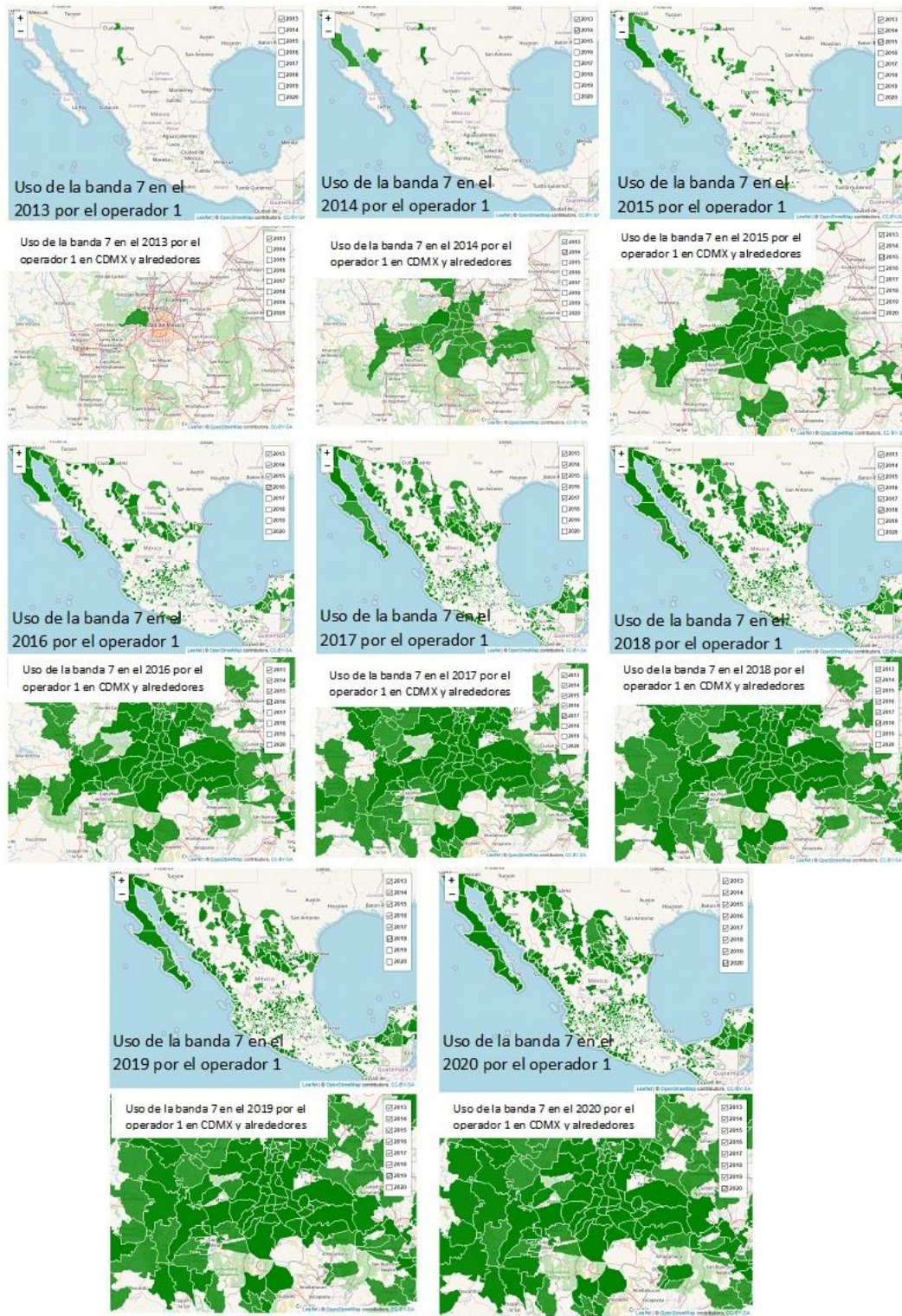
El operador 3 utiliza la banda de 1900 MHz. Ha tenido un porcentaje de uso relativamente menor que el que los dos operadores anteriores les dan a las bandas que tienen asignadas. El año 2016 es el que presenta el mayor porcentaje de uso. El despliegue de la banda puede observarse primero en el centro del país, posteriormente en los núcleos urbanos del norte del país y en los años más recientes, en los núcleos urbanos del sur del país. Finalmente, el porcentaje de uso de la banda de 700 MHz del operador 4 es muy menor comparado con el de los 3 operadores anteriores. Esto puede deberse a que el operador 4 acaba de iniciar operaciones recientemente, a que se encuentra desplegando la Red Compartida en el territorio mexicano y a que es un operador mayorista. En el mapeo de los datos se puede observar que el despliegue de la red inició en el centro del país. Posteriormente en el municipio de Guadalajara y en la parte norte del país con el municipio de Mexicali, entre otros, para continuar con la parte sur en municipios como Cancún (Benito Juárez) y Mérida.

**Figura 19** Uso de la banda de 1700 - 2100 MHz (AWS) del operador 1



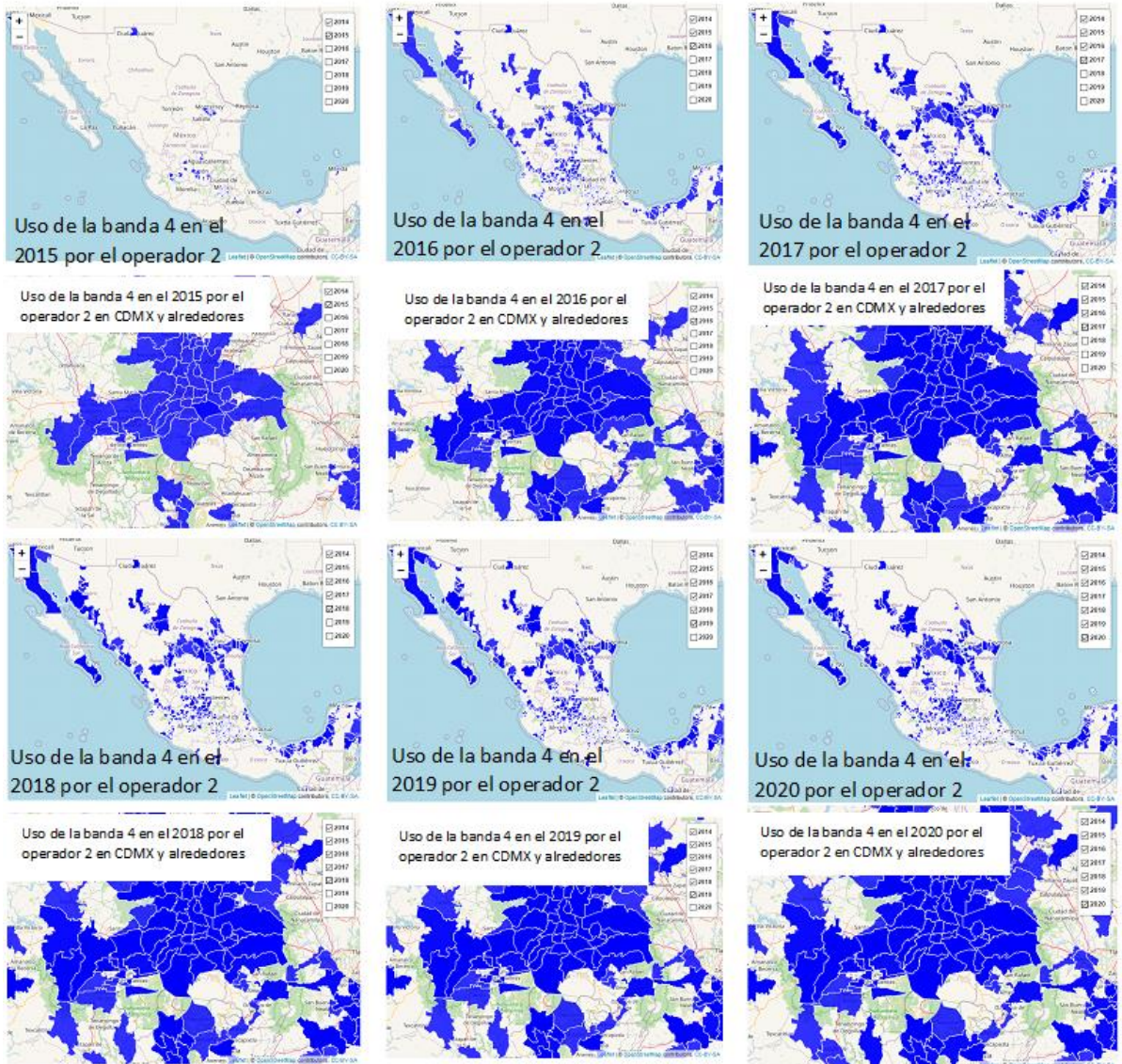
Fuente: elaboración propia.

**Figura 20** Uso de la banda de 2500 MHz del operador 1



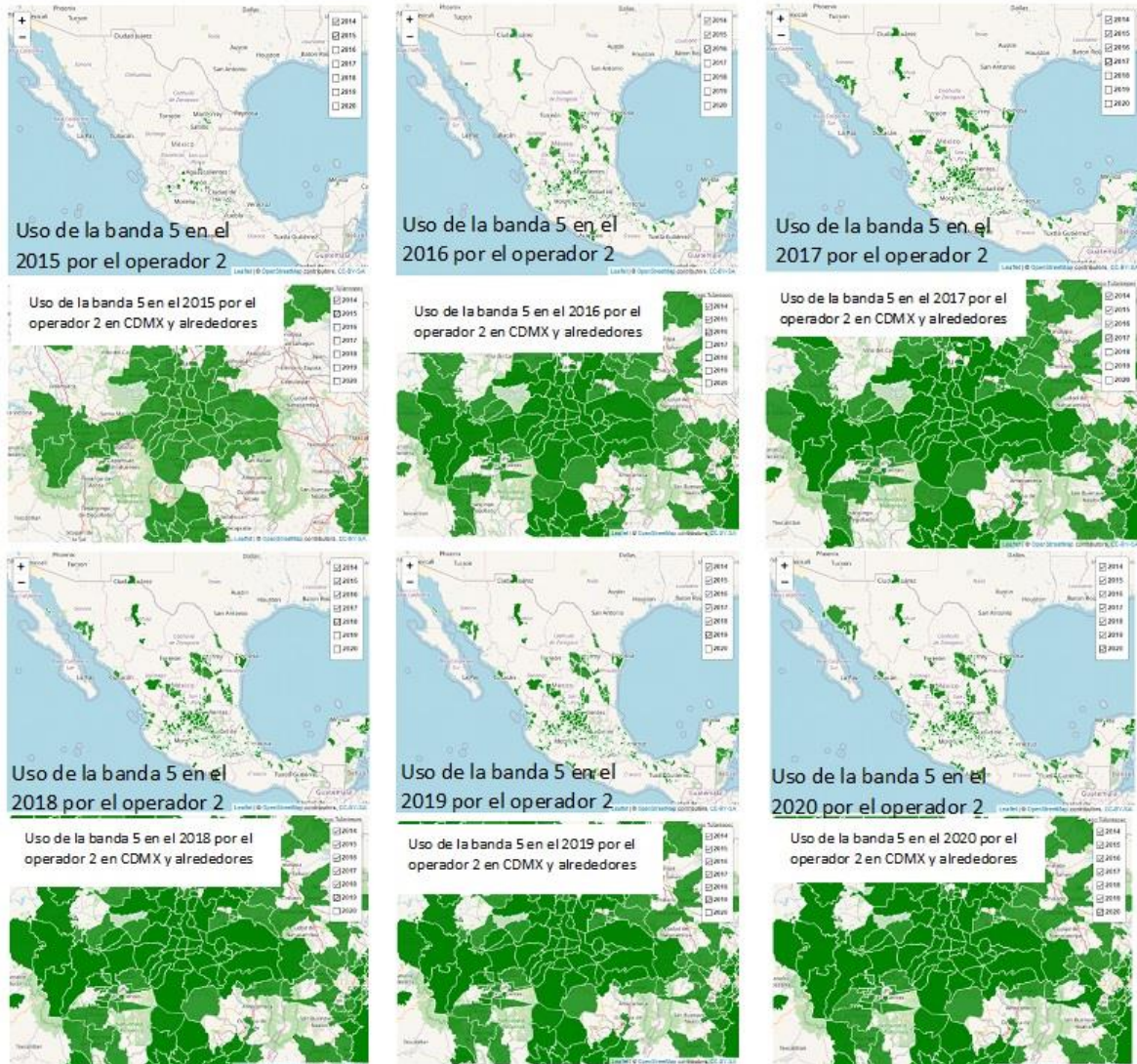
Fuente: elaboración propia.

**Figura 21** Uso de la banda de 1700 - 2100 MHz (AWS) del operador 2



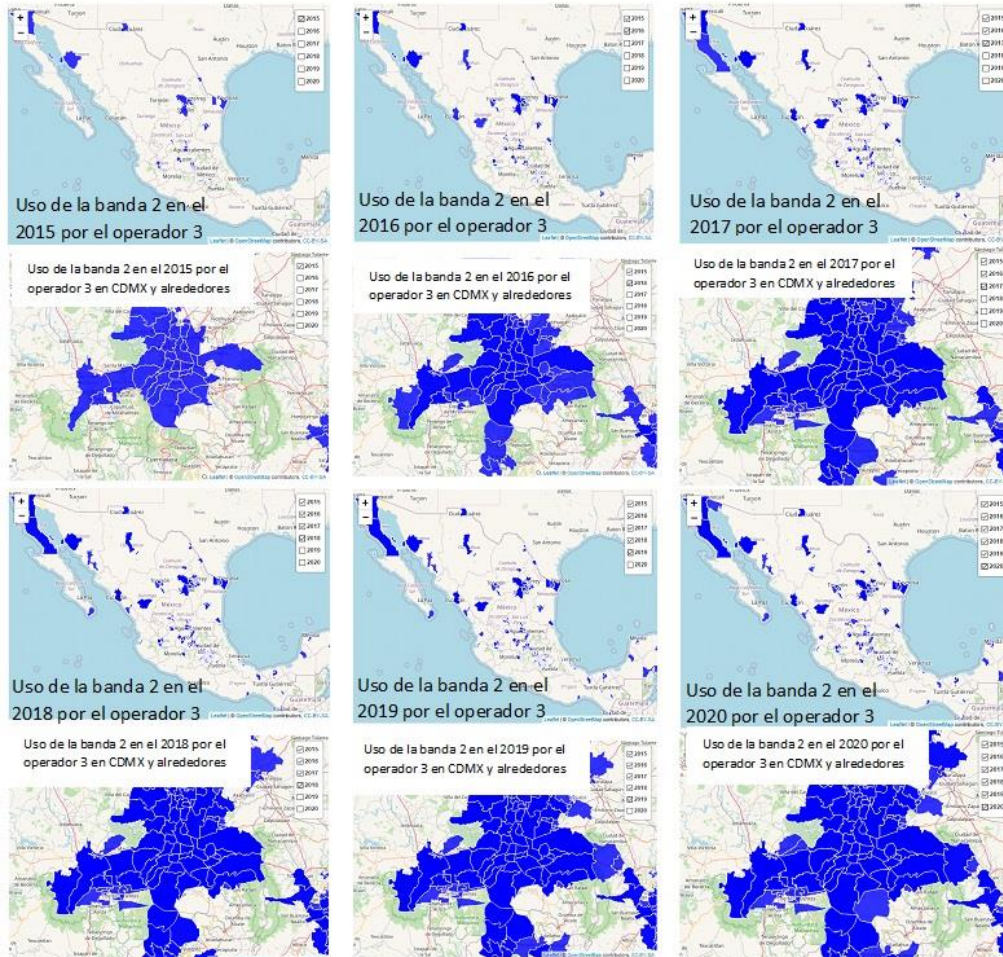
Fuente: elaboración propia.

**Figura 22** Uso de la banda de 800 MHz del operador 2



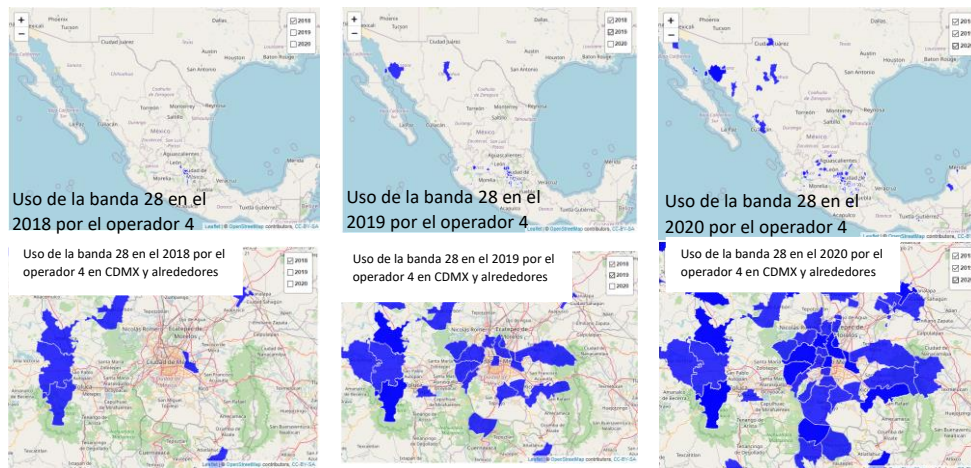
Fuente: elaboración propia.

**Figura 23** Uso de la banda de 1900 MHz (PCS) del operador 3



Fuente: elaboración propia.

**Figura 24** Uso de la banda de 700 MHz del operador 4



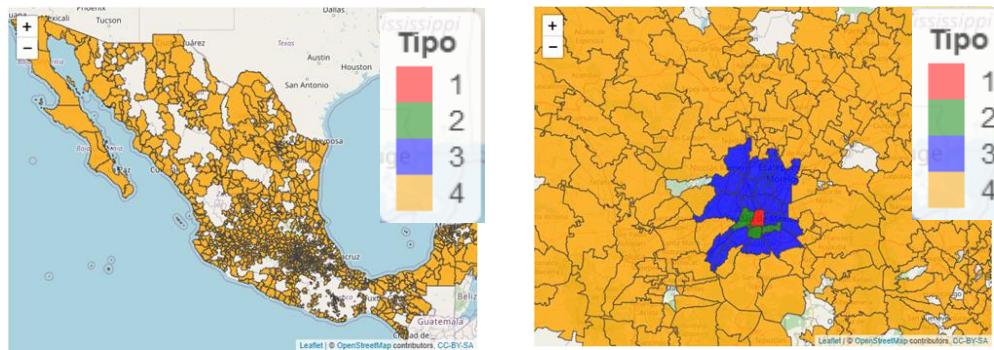
Fuente: elaboración propia.

#### 6.4 Clasificación de municipios según su infraestructura móvil

Para poder conocer cuál ha sido la densificación de red por operador en México a través de los años, se decidió clasificar los municipios de acuerdo con la infraestructura de red que cada operador tiene desplegada. Por lo que, para cumplir con el objetivo anterior se utilizó el análisis de *clusters* k-medias. La clasificación se llevó a cabo dividiendo el número total de nodos por municipio (nodos), entre la superficie territorial del municipio (km<sup>2</sup>), dando como resultado la densificación espacial de los nodos por municipio en nodos/km<sup>2</sup> por operador, es decir, se realizaron cuatro clasificaciones en total. Para llevar a cabo los cálculos anteriores se utilizó el software de Stata para realizar el análisis de los datos y *RStudio* para el mapeo de la información. En las Figuras 25 a 28 se muestra la clasificación por *clusters* mapeada por la ubicación geográfica de cada municipio. En la imagen del lado izquierdo se muestra a nivel país y en la del lado derecho se muestra la región del centro del país (CDMX y alrededores). En las Tablas 8 a 11 se despliegan las características de los *clusters* por operador. Así mismo, se agregó el geotipo al que pertenecen la mayoría de los municipios ubicados en el mismo *cluster*.

Para el primer operador se hicieron pruebas con 4, 5 y 6 *clusters*. Se decidió utilizar la clasificación de cuatro tipos, ya que para cinco y seis había más de un *cluster* con un solo municipio. Los *clusters* tipo 1 y tipo 4 solo se encuentran en la Ciudad de México (CDMX).

**Figura 25** Distribución geográfica de los *clusters* del operador 1.



Fuente: elaboración propia.

Los municipios de tipo 1 tienen una gran densidad de nodos, ubicándose al centro del país. Se encuentran en zonas con una gran densidad de población y con gran cantidad de nodos en las mismas. La mayoría de los municipios se encuentran clasificados en el tipo 2. Son aquellos que tienen poca densidad de nodos, es decir, tienen una gran extensión territorial pero poca cantidad de nodos. Los del tipo 3 se encuentran al centro del país. Son aquellos municipios que tienen una extensión territorial pequeña y que cuentan con varios nodos en su área geográfica. Finalmente, el municipio tipo 4 es el que pertenece al municipio de Cuauhtémoc, siendo el que tiene el valor de densidad de nodos más alto. Esto quiere decir, que es el municipio con menor extensión territorial y con mayor cantidad de nodos dentro de su territorio.

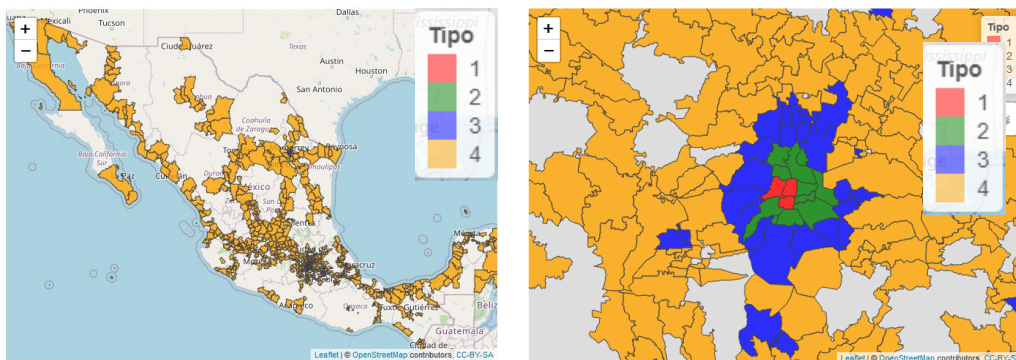
**Tabla 8** Características de los *clusters* del operador 1

Tipo	Geotipos	Cantidad	Centroide dens_esp
1	Urbano	3	0.000418318
2	Rural	1,313	0.014192918
3	Suburbano	26	0.073900223
4	Urbano	1	0.127724409

Fuente: elaboración propia.

Con el operador 2 se hicieron pruebas con 3 y con 5 tipos, sin embargo, con 3 resultaban muy pocos y con 5 resultaban demasiados, es decir, había más de dos tipos con un solo municipio. Por lo que se decidió clasificar los municipios en cuatro tipos, al igual que el operador 1.

**Figura 26** Distribución geográfica de los *clusters* del operador 2.



Fuente: elaboración propia.

Los municipios de tipo 1, 2 y 3 se encuentran ubicados en el centro del país. Siendo los de tipo 1 los que tienen una densificación de nodos mayor. Los de tipo 2, se encuentran alrededor de los de tipo 1. Los municipios de tipo 2 tienen una extensión territorial un poco mayor respecto a los de tipo 1, así mismo tienen una menor cantidad de nodos en comparación con los de tipo 1. Los municipios de tipo 3 se encuentran alrededor de los de tipo 1 y 2. Teniendo una densificación de nodos menor a los de

tipo 1 y 2. La mayoría de los municipios pertenece al tipo 4. Los municipios de tipo 4 tienen una extensión territorial considerable y tienen pocos nodos ubicados geográficamente dentro del municipio.

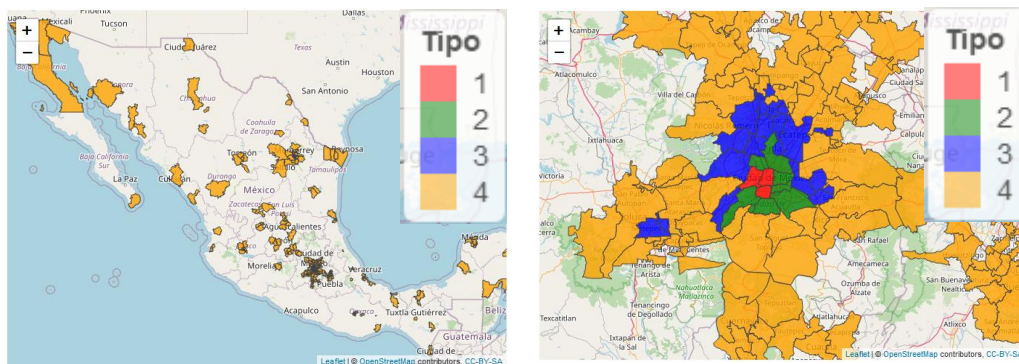
**Tabla 9** Características de los *clusters* del operador 2

Tipo	Geotipo	Cantidad	Centroide dens_esp
1	Urbano	3	0.000252237
2	Urbano	10	0.004657545
3	Suburbano	40	0.016779315
4	Rural	616	0.048475787

Fuente: elaboración propia.

El operador 3 también se clasificó en 4 tipos de *clusters* diferentes. Al igual que con el operador 2, se hicieron pruebas con 3 y con 5 tipos. Sin embargo, con 3 resultaban muy pocos y con 5 resultaban demasiados, es decir, había más de dos tipos con un solo municipio.

**Figura 27** Distribución geográfica de los *clusters* del operador 3.



Fuente: elaboración propia.

Las características de los *clusters* son similares a las del operador 2. El tipo 1 corresponde a los municipios con mayor densidad de nodos. El tipo 2 corresponde a los municipios que se encuentran a su alrededor, teniendo una densidad de nodos

menor a los del tipo 1, pero mayor a los del tipo 3. Los municipios de tipo 3, se encuentra alrededor de los de tipo 1 y 2. La mayoría de los municipios pertenecen al tipo 4. Siendo estos últimos los municipios con una extensión territorial mayor, pero con poca cantidad de nodos ubicados geográficamente dentro del municipio.

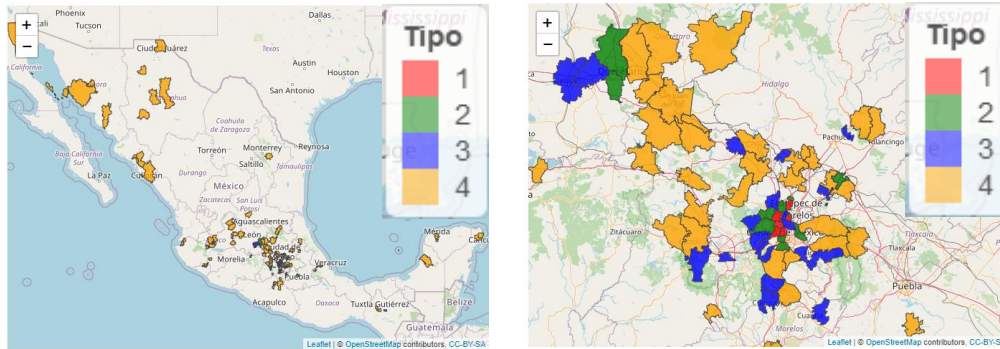
**Tabla 10** Características de los *clusters* del operador 3

Tipo	Geotipo	Cantidad	Centroide dens_esp
1	Urbano	3	0.000622009
2	Urbano	8	0.006011053
3	Suburbano	22	0.016656819
4	Rural	218	0.043999857

Fuente: elaboración propia.

Por último, el operador 4 también se clasificó en cuatro tipos de *clusters* diferentes. Al igual que con los operadores anteriores, se realizaron pruebas con 3 y con 5 tipos diferentes. Los municipios de tipo 1 se encuentran ubicados en la parte central del país. Son los municipios con una densificación de nodos mayor. La mayoría de los municipios de tipo 2 se encuentran alrededor de los municipios tipo 1. A diferencia de los operadores anteriores, hay municipios tipo 2 en los estados de Querétaro y Colima. Los municipios tipo 3 se encuentran en su mayoría en la parte central del país. Cabe resaltar que el municipio de Zinacatán del estado de Chiapas, ubicado al sur del país pertenece a este grupo. Finalmente, la mayoría de los municipios pertenece al tipo 4. Los municipios tipo 4 tienen características similares a las de los operadores anteriores. Es decir, son los municipios con mayor extensión territorial, pero con poca cantidad de nodos.

**Figura 28** Distribución geográfica de los *clusters* del operador 4.



Fuente: elaboración propia.

**Tabla 11** Características de los *clusters* del operador 4

Tipo	Geotipo	Cantidad	Centroide dens_esp
1	Urbano	5	3.73E-05
2	Suburbano	10	0.000156543
3	Rural	22	0.000440704
4	Rural	74	0.001223689

Fuente: elaboración propia.

## Capítulo 7. Análisis y discusión

Respecto a las estrategias de despliegue de banda de los operadores analizados, se puede concluir que los primeros tres operadores han utilizado en mayor medida nodos ya existentes, a diferencia del operador 4, el cual ha creado mayor cantidad de nodos nuevos. Por otro lado, los operadores 1 y 2 utilizan en mayor medida la banda AWS con nodos tanto nuevos como existentes, a diferencia de la otra banda que tienen asignada en donde prefieren utilizar en mayor medida nodos existentes.

En cuanto a las estrategias de aumento de capacidad de la red, los cuatro operadores han seguido una estrategia de cobertura similar. Densificando en primera instancia el centro del país, posteriormente los núcleos urbanos y finalmente las zonas con menor cantidad de población y mayor extensión territorial. La diferencia principal radica en los acuerdos realizados entre los operadores para lograr un aumento en la capacidad de sus redes.

En general, del porcentaje de uso de las bandas de frecuencia de los datos analizados se obtiene que el uso que han dado los primeros tres operadores en las bandas de frecuencia que tienen asignadas ha tenido variaciones considerables a través de los años. El caso del operador 4 es diferente al de los tres anteriores, debido a que ha tenido un porcentaje de uso menor en comparación. Sin embargo, este porcentaje ha ido en aumento con el paso del tiempo.

Por su parte, de la clasificación de los municipios según su infraestructura móvil, se puede concluir que los municipios con mayor densidad de nodos se encuentran ubicados geográficamente en la parte central del país. En contraste con los municipios con menor densidad de nodos, que se encuentran dispersos a lo largo del territorio mexicano. Lo anterior sugiere que es necesario desplegar mayor cantidad de nodos en diversas regiones del territorio mexicano para lograr una mayor cobertura de la red móvil de los operadores. Cabe recalcar que los operadores 3 y 4 arrendan su

infraestructura principalmente a Operadores Móviles Virtuales (OMV's). Estos últimos han llevado conectividad a los geotipos rurales. En esta investigación no se encontró ningún operador presente en los municipios clasificados como geotipos abiertos.

Como trabajos futuros se sugiere utilizar este método en otros países y otras áreas geográficas en diferentes niveles de desagregación, para lograr un mayor entendimiento respecto a las estrategias de infraestructura utilizadas por los OMR globalmente. Otra aproximación puede ser utilizar la clasificación de clústeres por K-medias utilizando otras variables. Así mismo, se podrían utilizar otras técnicas de clasificación de la infraestructura móvil como el análisis de factores utilizando parámetros distintos a los utilizados en esta investigación. Finalmente, se sugiere desarrollar técnicas más avanzadas de análisis de datos a partir de los datos disponibles de crowdsourced de los operadores móviles. Estos pueden ser utilizados en otro tipo de estudios como en la planeación y simulación de redes móviles. A continuación, en la Tabla 12 se presenta la relación entre las políticas públicas analizadas y los resultados obtenidos. En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones en base a las políticas públicas analizadas y a los resultados obtenidos del análisis de los datos crowdsourced.

**Tabla 12.** Relación entre la política pública y los resultados obtenidos.

<b>Documento</b>	<b>Política Pública</b>	<b>Resultados</b>
artículo 6 de la Constitución	El Estado garantizará el derecho de acceso a las tecnologías de la información y comunicación.	Estrategia de cobertura similar de los principales OMR en México.
artículo 36 de la LOAPF	Corresponde a la SCT planear, fijar y conducir las políticas y programas de cobertura universal y cobertura social.	Estrategia de cobertura similar de los principales OMR en México.
artículo 210 de la LFTR	La Secretaría de Comunicaciones y Transportes elaborará cada año un Programa de Conectividad en Sitios Públicos.	Estrategia de cobertura similar de los principales OMR en México.
artículo 15 de la LFTR	Los concesionarios tendrán obligaciones de cobertura geográfica, poblacional o social, de conectividad en sitios públicos y de cobertura universal.	Todos los operadores comparten características similares de desempeño en la red LTE en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila.

artículos 55,76 y 142 de la LFTR	La Red Compartida contará con “espectro determinado” el cual confiere el derecho de usar, aprovechar y explotar bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico.	Uso de infraestructura existente para desplegar nuevos nodos en las bandas de frecuencia.
artículo 142 de la LFTR	El IFT asignará 90 MHz de la banda de frecuencia de 700 MHz, para la operación y explotación de una red compartida mayorista	Uso de infraestructura existente para desplegar nuevos nodos en las bandas de frecuencia.
artículo 140 de la LFTR	Si existe infraestructura de la RCM en alguna zona geográfica, el gobierno garantizará que el servicio llegue a los usuarios finales.	En los datos analizados, no se encontró una correlación positiva entre la densificación de nodos y las características tecnológicas de las bandas de frecuencia.
artículo 143 de la LFTR	El título de concesión de las redes compartidas mayoristas incluirá obligaciones de cobertura, calidad y precio y aquellas que determine el IFT.	No se encontraron diferencias significativas entre los OMR y los OMR en el Pueblo Mágico de Arteaga, Coahuila.
artículo 144 de la LFTR	Recalca los principios bajo los que operarán las redes compartidas mayoristas, incluyendo la compartición de toda su infraestructura.	No se encontraron diferencias significativas entre los OMR y los OMR en el Pueblo Mágico de Arteaga, Coahuila.
artículo 13 de la LFTR	Establece que el Ejecutivo Federal, a través de la SCT, realizará las acciones tendientes a garantizar la instalación de la Red Compartida.	Existe una correlación lineal positiva entre la variable de adopción desde la demanda, cantidad de personas con teléfono celular a nivel municipal y la variable de la oferta, cantidad de celdas por área.
artículo 17 de la Constitución	Establece que el Ejecutivo Federal incluirá en el Plan Nacional de Desarrollo un programa de banda ancha en sitios públicos que identifique el número de sitios a conectar cada año, hasta alcanzar la cobertura universal.	Estrategia de cobertura similar de los principales OMR en México.
artículo 28 de la LFTR	Establece que, para el logro de la cobertura universal, la Secretaría (SCT) elaborará cada año un Programa de Conectividad en Sitios Públicos.	Uso de infraestructura existente para desplegar nuevos nodos en las bandas de frecuencia.
artículo 210 de la LFTR	Define la política de inclusión digital universal con el propósito de cerrar la brecha digital existente entre individuos, hogares, empresas y áreas geográficas de distinto nivel socioeconómico.	Existe una correlación lineal positiva entre la variable de adopción desde la demanda, cantidad de personas con teléfono celular a nivel municipal y la variable de la oferta, cantidad de celdas por área.

Referencia: Elaboración propia.

## Conclusiones y recomendaciones

En esta tesis se analizaron algunas de las políticas públicas relacionadas con las telecomunicaciones móviles; algunas de las medidas de desempeño de los operadores móviles en Arteaga, Coahuila; el nivel de adopción de la tecnología móvil; y las redes LTE de los principales operadores móviles en México para cumplir con el objetivo de esta investigación: medir la incidencia de las políticas públicas de despliegue en la cobertura de zonas con baja densidad de población. Así mismo, se analizaron las estrategias de despliegue de los principales operadores móviles con red en México enfocadas en tres vertientes (a) inversión en infraestructura nueva para el despliegue de nuevas tecnologías; (b) fomento de la cobertura móvil en zonas rurales; y (c) aprovechamiento de las características tecnológicas del espectro para brindar cobertura con redes móviles LTE. Para lograrlo, se utilizaron grandes cantidades de datos *crowdsourced* de MLS y OpenCellid desde el año 2013 al 2020. También, en esta investigación se aplica un método que permite analizar las estrategias de despliegue de infraestructura de los OMR a partir de datos *crowdsourced*. El método aplicado en esta investigación ha sido utilizado anteriormente por Frias et al. (2020) para el análisis de los operadores móviles en Londres. A continuación, se explica a detalla la relación entre la política pública analizada, los resultados obtenidos y las conclusiones que se derivan de ellas.

En primer lugar, se analiza el artículo 6 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Esta política establece que el estado garantizara el derecho de acceso a las tecnologías de la información y comunicaciones. Así mismo, el artículo 36 de la Ley Orgánica de Administración Pública Federal (LOAPF) establece que corresponde a la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT) planea, fijar y conducir las políticas y programas de cobertura universal y cobertura social. También, el artículo 210 de la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión (LFTR) establece que la SCT elaborará cada año un programa de conectividad de sitios públicos. Por último, el artículo 17 de la constitución establece que el Ejecutivo Federal

incluirá en el Plan Nacional de Desarrollo un programa de banda ancha en sitios públicos que identifique el número de sitios a conectar cada año, hasta alcanzar la cobertura universal. Por su parte, de los resultados obtenidos de los datos *crowdsourced* respecto a las estrategias de despliegue de banda de los operadores analizados, se puede concluir que todos los operadores han seguido una estrategia de cobertura similar, iniciando el despliegue de su red en la parte central de la república, posteriormente cubriendo las principales ciudades del norte del país, finalmente cubriendo los principales núcleos urbanos del sur de la república. De acuerdo con la clasificación de *clusters* obtenida en los resultados, se puede observar que existen gran cantidad de municipios con baja densidad de población y baja densidad de nodos. Se espera un mayor contraste en la estrategia de despliegue del operador Altan Redes respecto a los demás operadores, ya que tiene el compromiso de cobertura social del 7.2% de la población para enero del 2022. La cobertura social se encuentra enfocada principalmente en los estados de Oaxaca, Chiapas y Veracruz. Lo anterior se debe a que en el programa de cobertura social 2020-2021 de la SCT se identificaron estos estados como aquellos en los cuales se encuentran las localidades de atención prioritaria. La mayoría de los municipios de los estados mencionados anteriormente no se encuentran cubiertos por los principales operadores con red en México, esto puede deberse a que son en su mayoría zonas de baja densidad de población y una amplia extensión territorial, lo cual se traduce en poca rentabilidad para los operadores.

En segundo lugar, se analizaron los artículos 28, 55, 76 y 142 de la LFTR en los cuales se establece que, para el logro de la cobertura universal, la SCT elaborará cada año un Programa de Conectividad en Sitios Públicos. La diferencia principal entre el programa de conectividad de cobertura social y el programa de conectividad en sitios públicos radica en que el objetivo del primero es garantizar el acceso a servicios de telecomunicaciones de forma asequible a toda la población. Y el segundo programa se enfoca en identificar y localizar sitios que presenten necesidades de conectividad social, brindando la conectividad a Internet de forma gratuita. Además, en los artículos antes mencionados, se plantea que la Red Compartida contará con “espectro

determinado” el cual confiere el derecho de usar, aprovechar y explotar bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico. Mismo que se define en el artículo 142, es decir, el IFT asignará 90 MHz de la banda de frecuencia de 700 MHz, para la operación y explotación de una Red Compartida Mayorista (RCM). Estas políticas públicas se relacionan directamente con los resultados obtenidos respecto al uso de la infraestructura de los operadores móviles. Es decir, los primeros tres operadores han utilizado en mayor medida nodos ya existentes, a diferencia del operador 4, el cual ha utilizado mayor cantidad de nodos nuevos. Por otro lado, los operadores 1 y 2 utilizan en mayor medida la banda AWS con nodos tanto nuevos como existentes, a diferencia de la otra banda que tienen asignada en donde prefieren utilizar en mayor medida nodos existentes. De lo anterior se obtiene que la mayoría de los operadores, de acuerdo con los datos analizados, prefieren utilizar la infraestructura existente para desplegar nuevos nodos.

Como tercer punto, se analizaron los artículos 143 y 144 de la LFTR. En estos se menciona que el título de concesión de las redes compartidas mayoristas incluirá obligaciones de cobertura, calidad, precio y aquellas que determine el IFT. Así mismo, recalca los principios bajo los que operarán las redes compartidas mayoristas, incluyendo la compartición de toda su infraestructura. Estas políticas se relacionan directamente con el análisis realizado en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila, en donde se compararon algunas de las medidas de desempeño entre los Operadores Móviles con Red (OMR) y los Operadores Móviles Virtuales (OMV). Siendo uno de los principales resultados obtenidos que no se encontraron diferencias significativas entre los OMV y los OMR respecto a las medidas de desempeño en el Pueblo Mágico de Arteaga, Coahuila. Mismo que fue cubierto por la RCM de Altán Redes en septiembre del 2019.

En cuarto lugar, se analizó el artículo 15 de la LFTR, en el cual se establece que los concesionarios (operadores móviles) tendrán obligaciones de cobertura geográfica, poblacional o social, de conectividad en sitios públicos y de cobertura universal. Esta

política se relaciona con un segundo resultado obtenido de la comparativa de los operadores móviles en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila. En donde se obtuvo que todos los operadores comparten características similares de desempeño en la red LTE en el pueblo mágico de Arteaga, Coahuila. Lo cual indica que la RCM ha estado cumpliendo con sus obligaciones de cobertura a un nivel de calidad similar al de los OMR.

En quinto lugar, se analizaron los artículos 13 y 210 de la LFTR. El primero establece que el Ejecutivo Federal, a través de la SCT, realizará las acciones tendientes a garantizar la instalación de la Red Compartida. Mientras que el segundo define la política de inclusión digital universal con el propósito de disminuir la brecha digital existente entre individuos, hogares, empresas y áreas geográficas de distinto nivel socioeconómico. Estas políticas se relacionan con el análisis de adopción de la tecnología móvil realizada a través de variables de la oferta y la demanda. De este análisis se concluyó que existe una correlación lineal positiva entre la variable de adopción desde la demanda, cantidad de personas con teléfono celular a nivel municipal y la variable de la oferta, cantidad de celdas por área. Esto significa que los operadores móviles pueden, con cierto grado de confianza, invertir en infraestructura en áreas geográficas donde las variables de demanda, como la cantidad de personas con teléfonos celulares, tienen valores significativos. Además, los reguladores de telecomunicaciones como el IFT en México, pueden utilizar variables de oferta y demanda para inferir el nivel de adopción de tecnologías móviles a un nivel geográfico desagregado.

Finalmente, en sexto lugar, se analizó el artículo 140 de la LFTR, esta política establece que, si existe infraestructura de la RCM en alguna zona geográfica, el gobierno garantizará que el servicio llegue a los usuarios finales. Esto se relaciona con los resultados obtenidos en cuanto al uso de las bandas de frecuencia por parte de los operadores móviles. En donde se puede observar que aún queda gran cantidad de espectro disponible. Así mismo, dos operadores arrendan dos bandas de frecuencia,

cuando en países más desarrollados, como Inglaterra o España, existen operadores que arrendan hasta tres bandas de frecuencia distintas. En los datos analizados, no se encontró una correlación positiva entre la densificación de nodos y las características tecnológicas de las bandas de frecuencia. Esto significa que los recursos, como el espectro, no han sido utilizados en su máxima capacidad, existiendo campo para sacarles un mayor provecho. En general, del porcentaje de uso de las bandas de frecuencia de los datos analizados se obtiene que el uso que han dado los primeros tres operadores en las bandas de frecuencia que tienen asignadas ha tenido variaciones considerables a través de los años. El caso del operador 4 es diferente al de los tres anteriores, debido a que ha tenido un porcentaje de uso menor en comparación. Sin embargo, este porcentaje ha ido en aumento con el paso del tiempo. En todos los casos, en los datos analizados no se encontró una correlación positiva entre la densificación de nodos y las características tecnológicas de las bandas de frecuencia. De lo anterior, se sugiere facilitar a los operadores la arrendación de bandas en diversas frecuencias que permitan aprovechar las características tecnológicas de las mismas; a través de costos que se encuentren alineados al mercado internacional. Así mismo, se sugiere el uso de las bandas bajas para brindar cobertura en zonas rurales. Lo anterior debido a las características tecnológicas de propagación de las bandas bajas. También, se sugiere el uso de bandas altas en las zonas urbanas o con mayor densidad de población, por las características de gran capacidad de estas últimas.

Los resultados obtenidos son de interés para el gobierno mexicano, para los operadores móviles y para los órganos reguladores de telecomunicaciones en México. Así mismo, se espera que esta investigación pueda contribuir en brindar información a los usuarios finales y a los agentes antes mencionados respecto a la incidencia de las políticas públicas de telecomunicaciones y a las características de las redes de telecomunicaciones LTE que se encuentran operando. Se espera que esta investigación sirva de apoyo en la toma de decisiones para la implementación de nuevas tecnologías de telecomunicaciones en México.

Para tener un mejor futuro en materia de telecomunicaciones en México es necesario continuar haciendo esfuerzos que propicien un mercado más balanceado, el cual facilite la entrada de nuevos competidores y que fomente el crecimiento de la cuota de mercado de los OMVs. Así mismo, se sugiere continuar invirtiendo en infraestructura nueva que ayude a reducir la brecha digital. Se espera que el concurso de acreedores en el que se encuentra actualmente Altán Redes, responsable de la Red Compartida Mayorista (RCM) en México se lleve a buen término. Esto último con el afán de que se cumpla el compromiso de cobertura de llevar infraestructura de telecomunicaciones al 92.2% de la población para el año 2024. Ya que, es sabido que el acceso a las telecomunicaciones móviles, y a través de ellas al Internet, puede brindar mayor bienestar social. Por otro lado, se espera que en la licitación que se está llevando a cabo actualmente (IFT-10), con diversos segmentos de la banda de frecuencia (814-824 / 859-869 MHz, 1755-1760 / 2155-2160 MHz, 1910-1915 / 1990-1995 MHz y 2500-2530 / 2620-2650 MHz) los cuales son de interés para las telecomunicaciones móviles, se cuente con la participación de los principales OMR en México. Así mismo, se sugiere que se continúe potencializando el aprovechamiento de los recursos naturales, como son las bandas de frecuencia, para continuar ofreciendo los servicios de telecomunicaciones móviles. También, que se continúen los esfuerzos de reducir la brecha digital a través de alianzas público-privadas como la de la RCM y que se siga impulsando la cobertura en las zonas rurales en México; o de baja densidad de población y gran extensión territorial. Lo anterior permitirá el acceso de nuevas tecnologías como la 5G o la Internet de las Cosas (IoT). Lo cual brindará grandes beneficios en diversos sectores de la sociedad.

## Referencias

- Altan Redes. (2020). *Altán Redes: desarrollador de la Red Compartida Agenda*.  
[http://www.ift.org.mx/sites/default/files/presentacion\\_isabel\\_prieto\\_altan-panel\\_ift.pdf](http://www.ift.org.mx/sites/default/files/presentacion_isabel_prieto_altan-panel_ift.pdf)
- Altan Redes. (2021). *Our coverage*. Altan Redes.  
<https://www.altanredes.com/en/solutions-to-operators/our-coverage/>
- Álvarez, C. L. (2018). *Telecomunicaciones y Radiodifusión en México* (Primera). Posgrados de Derecho de la UNAM.  
<http://lib.tkk.fi/Diss/2012/isbn9789526045252/>
- Ávila, A. (2020). Así me fue probando la Red Compartida : ¿ vale la pena dejar a Telcel , AT & T o Movistar? *Unocero*, 1–14.  
<https://www.unocero.com/opinion/vale-la-pena-la-red-compartida-resena-retemex/>
- Ayala, E., Chapa, J., García, L., & Hibert, A. (2018). Efectos sociales de la reforma de las telecomunicaciones en México. *Políticas de Telecomunicaciones*, 42(1), 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.07.013>
- Basaure, A., Suomi, H., & Hämmäinen, H. (2016). Transaction vs. switching costs - Comparison of three core mechanisms for mobile markets. *Telecommunications Policy*, 40(6), 545–566. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2016.02.004>
- Bauer, J. M. (2019). The Role of Regulation in 5G Market Design. *Social Science Research Network*, 47, 1–28. <https://ssrn.com/abstract=3421024>
- Bnamericas. (2020a). *Bajo la lupa: las 2 mayores empresas de torres de telecomunicaciones de México*. 2–5.  
<https://www.bnamericas.com/es/reportajes/bajo-la-lupa-las-2-mayores-empresas-de-torres-de-telecomunicaciones-de-mexico>
- Bnamericas. (2020b). Las dos mayores empresas de torres de telecomunicaciones

de México. *Bnamericas*, 2–5. <https://www.bnamericas.com/en/news/spotlight-mexicos-2-biggest-telecom-tower-companies>

Bravo, J. (2021). La Red Descompuesta. *El Economista*, 1–14.

<https://www.economista.com.mx/opinion/La-Red-Descompuesta-20210430-0049.html>

Cahun, A. (2019). *Telefónica Movistar no se va de México , pero " abandona " la competencia directa en el país para dar prioridad a otros mercados*. 1–21.

<https://www.xataka.com.mx/telecomunicaciones/telefonica-movistar-no-se-va-mexico-abandona-competencia-directa-pais-para-dar-prioridad-a-otros-mercados>

CalSPEED. (2019). *About CalSPEED*. <http://calspeed.org/about.html>

Centro de Estudios de Desarrollo Regional y Urbano Sustentable (CEDRUS/UNAM).

(2019). *Densidad de Población en los Municipios de México 2010 y 2015*.

<https://cedrus-unam.blogspot.com/2019/04/densidad-de-poblacion-en-los-municipios.html>

Diario Oficial, & IFT. (2018). *Calidad del Servicio Local Móvil*.

[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5510754&fecha=17/01/2018](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510754&fecha=17/01/2018)

DOF. (2013). *DECRETO por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de los artículos 6o., 7o., 27, 28, 73, 78, 94 y 105 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en materia de telecomunicaciones*.

[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5301941&fecha=11/06/2013](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5301941&fecha=11/06/2013)

Ekanoye, F., Rouge, B., Olokunde, T., Rouge, B., Mbarika, V., Rouge, B., & Musa, P.

(2018). *An Exploration of Relationships Between Mobile Network Operators ( MNO ) and Mobile Virtual Network Operations ( MVNO ) in Nigeria : A Case Study of MVNO in United States of America*. 10(2), 2–5.

<https://doi.org/10.4018/IJITN.2018040101>

El Financiero. (2020). IFT da permiso a Telefónica México para rentar espectro de

AT&T. *El Financiero*, 1–7. <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/ift-da>

permiso-a-telefonica-mexico-para-rentar-espectro-de-at-t/

- El Mexicano. (2019). *Internet para Todos reemplaza a México Conectado en Presupuesto 2019*. 7–8. <https://www.el-mexicano.com.mx/nacional/internet-para-todos-reemplaza-a-mexico-conectado-en-presupuesto-2019/959369>
- ENACOM. (2020). *Comunicaciones Móviles Argentina*. <https://www.enacom.gov.ar/>
- ENDUTIH. (2019). *Comunicado de Prensa del IFT*.  
<http://www.ift.org.mx/comunicacion-y-medios/comunicados-ift/es/en-mexico-hay-806-millones-de-usuarios-de-internet-y-865-millones-de-usuarios-de-telefonos-celulares>
- Frias, Z., Mendo, L., & Oughton, E. J. (2020). How Does Spectrum Affect Mobile Network Deployments? Empirical Analysis Using Crowdsourced Big Data. *IEEE Access*, 8, 190812–190821. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3031963>
- Gobierno de Bolivia. (2017). *Encuesta Nacional de Opinión sobre TIC*.  
<https://datos.gob.bo/dataset/encuesta-nacional-de-opinion-sobre-tic>
- Gobierno de Chile. (2021). *Data Chile*. <https://es.datachile.io/geo/chile>
- Gobierno de Colombia. (2021). *Abonados , ingresos y tráfico de Internet móvil por demanda*. <https://www.datos.gov.co/dataset/Abonados-ingresos-y-tr-fico-de-Internet-m-vil-por-/wsev-an7k>
- Gobierno de Perú. (2021). *Lineas Moviles*. Plataforma Nacional de Datos Abiertos.  
<https://www.datosabiertos.gob.pe/dataset/líneas-móviles>
- GSMArena. (2020). Cobertura de red en México. *GSMA*, 9–11.  
<https://www.gsmarena.com/network-bands.php3?sCountry=MEXICO>
- Hernández Tofoya, M. R. (2021). *En busca de la política digital en México*.
- Huidobro Moya, J. M. (2010). *Telecomunicaciones: tecnologías, redes y servicios (Primera)*. España Ra-Ma.

- Ibarra, D. (2021). Operadores Móviles Virtuales en México 2021. *Selectra*, 1–7.  
<https://selectra.mx/celular/operadores-moviles-virtuales>
- IFT. (2017). *Las Telecomunicaciones a 4 años de la Reforma Constitucional en México*.  
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/estadisticas/a4anosdelareforma.pdf>
- IFT. (2018). *Especificaciones de calidad del servicio móvil*.  
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/4417/documentos/20180117matift.pdf>
- IFT. (2019a). Cuarto informe trimestral estadístico 2019. In *Instituto Federal de Telecomunicaciones*. <http://www.ift.org.mx/pagina-de-inicio/informes-estadisticos-trimestrales>
- IFT. (2019b). *IMT en México*. 1–11.  
[http://www.ift.org.mx/sites/default/files/imt\\_en\\_mexico\\_febrero\\_2019.pdf](http://www.ift.org.mx/sites/default/files/imt_en_mexico_febrero_2019.pdf)
- IFT. (2019c). *Panorama del espectro radioeléctrico en México para servicios móviles de quinta generación*.  
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/panoramadelespectroradioelectricoenmexicopara5g.pdf>
- IFT. (2020a). Análisis del impacto de las TIC en el desarrollo social en México. *IFT*.  
<http://www.ift.org.mx/estadisticas/analisis-del-impacto-de-las-tic-en-el-desarrollo-social-de-mexico>
- IFT. (2020b). Análisis sobre el mercado de Operadores Móviles Virtuales (OMVs) 2020. *IFT*. <http://www.ift.org.mx/estadisticas/analisis-sobre-el-mercado-de-los-operadores-moviles-virtuales-omvs>
- IFT. (2020c). Anuario Estadístico 2020. *IFT*.  
<http://www.ift.org.mx/estadisticas/anuario-estadistico-2020>

- IFT. (2020d). Comportamiento de los Indicadores de los Mercados Regulados 2020. *IFT*, 76.  
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/transparencia/Cindicadores2020.pdf>
- IFT. (2020e). *Efectos y Alternativas de la Iniciativa de la Reforma a la Ley Federal de Derechos para 2021 en materia de Espectro Radioeléctrico* (pp. 1–34).  
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/espectro-radioelectrico/efectosyalternativasdelainiciativadereformaalaleyfederaldederechospara2021enmateriadeespectroradioel.pdf>
- IFT. (2020f). *Segundo Informe Trimestral Estadístico 2020*.  
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/contenidogeneral/estadisticas/ite2t2020.pdf>
- IFT. (2021a). *IMT en México*.  
[http://www.ift.org.mx/sites/default/files/imt\\_en\\_mexico\\_2021\\_febrero2021.pdf](http://www.ift.org.mx/sites/default/files/imt_en_mexico_2021_febrero2021.pdf)
- IFT. (2021b). *INFORME DE CONSIDERACIONES DE LA “CONSULTA PÚBLICA SOBRE EL ANTEPROYECTO DE LINEAMIENTOS PARA LA GESTIÓN DE TRÁFICO Y ADMINISTRACIÓN DE RED A QUE DEBERÁN SUJETARSE LOS CONCESIONARIOS Y AUTORIZADOS QUE PRESTEN EL SERVICIO DE ACCESO A INTERNET”*. 1–156.  
<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/13791/documentos/21-06-27-informe-de-consideraciones-f.pdf>
- INEGI. (2018a). *Áreas Geoestadísticas Municipales. 1*, 1–6.  
[http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni\\_2018gw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/muni_2018gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no)
- INEGI. (2018b). *Catálogo de Claves de Entidades Federativas y Municipios*. 1–48.  
<https://www.inegi.org.mx/app/ageeml/>
- INEGI. (2018c). *Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la*

*Información en los Hogares (ENDUTIH) 2017.* [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)

INEGI. (2018d). *Número de habitantes por Municipio. Coahuila. Arteaga.*

<http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/coah/poblacion/default.aspx?tema=me>

INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020 (Issue Censo 2020).*

<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

ITU. (2017). *Quality of Service Regulation Manual.* [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB.QOS\\_REG01-2017-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/pref/D-PREF-BB.QOS_REG01-2017-PDF-E.pdf)

Khalifa, N. Ben, Benhamiche, A., Simonian, A., & Bouillon, M. (2018). Profit and Strategic Analysis for MNO-MVNO Partnership. *2018 IFIP Networking Conference (IFIP Networking) and Workshops*, 325–333.

Lotfi, M. H., Chen, X., & Sarkar, S. (2017). The Interplay of Competition and Cooperation Among Service Providers. *Cornell University.*

<http://arxiv.org/abs/1707.07080>

Lucas, N. (2020a). Telcel compra la banda de 3.5 GHz de Axtel y mete presión a la primera subasta de 5G en México. *El Economista*, 1–11.

<https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Telcel-compra-la-banda-de-3.5-GHz-de-Axtel-y-mete-presion-a-la-primera-subasta-de-5G-en-Mexico-20200701-0065.html>

Lucas, N. (2020b). Telefónica renuncia a sus concesiones mexicanas en las bandas de 800 MHz y PCS. *El Economista*, 1–13.

<https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Telefonica-renuncia-a-sus-concesiones-mexicanas-en-las-bandas-de-800-MHz-y-PCS-20200101-0012.html>

Lucas, N. (2021). Telefónica de México subió desempeño por el convenio que cerró con AT&T. *El Economista*, 5–24.

<https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Telefonica-Mexico-mejora-su-desempeno-por-el-convenio-con-ATT-pero-su-negocio-continua-en-reduccion->

20210513-0054.html

Martínez, A. (2020). Telefónica Movistar rentará espectro de AT & T para dar servicio en zonas rurales de México. *Milenio*, 1–9.  
<https://www.milenio.com/negocios/movistar-rentara-espectro-at-servicio-zonas-rurales>

Martínez, C. (2020). Ante alza en precio , AT&T devuelve espectro. *El Universal*, 1–6.  
<https://www.eluniversal.com.mx/cartera/ante-alza-en-precio-att-devuelve-espectro>

OECD. (2017). *OECD Reporte de telecomunicaciones y radiodifusión de México 2017*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1787/9789264280656-en>

OECD. (2019). *Encuestas económicas de la OCDE: México 2019*.  
<https://doi.org/doi.org/10.1787/19990723> .

OECD. (2020). *Latin American Economic Outlook 2020: Digital Transformation for Building Back* (O. Publishing (ed.)).  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1787/e6e864fb-en>

ONU. (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*.  
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>

OpenSignal. (2019). *OpenSignal: About us*. <https://www.opensignal.com/about/about-us>

OpenSignal. (2020). *Mexico Mobile Network Experience Report April 2020* (Issue April). <https://www.opensignal.com/reports/2019/10/mexico/mobile-network-experience>

Oughton, E. J. (2019). Quantified Global Broadband Strategies for Connecting Unconnected Communities. *University of Oxford*, 1–31.  
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3427492>

Oughton, E. J., & Frias, Z. (2018). Las implicaciones de costo, cobertura y despliegue

- de la infraestructura 5G en Gran Bretaña. *Telecommunications Policy*, 42(8), 636–652. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.07.009>
- Oughton, E. J., Frias, Z., Dohler, M., Whalley, J., Sicker, D., Hall, J. W., Crowcroft, J., & Cleavelly, D. D. (2018). La evaluación estratégica de la infraestructura nacional de comunicaciones digitales. *Digital Policy, Regulation and Governance*, 20(3), 197–210. <https://doi.org/10.1108/DPRG-02-2018-0004>
- Oughton, E. J., Frias, Z., van der Gaast, S., & van der Berg, R. (2019). Evaluación de la capacidad, cobertura y costo de las estrategias de infraestructura 5G: análisis de los Países Bajos. *Telematics and Informatics*, 37(January), 50–69. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2019.01.003>
- Overturf, C. (2019). *How does Speedtest measure my network speeds ?* Speedtest. <https://help.speedtest.net/hc/en-us/articles/360038679354-How-does-Speedtest-measure-my-network-speeds->
- Piedras, E. (2021). *Dinamismo y Diversificación de los OMVs en México al 1T-2021*. 0, 1–6.
- Profeco. (2020). *Evolución y cambio en oferta de servicios de telecomunicaciones*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/551880/Evolucion\\_y\\_Cambio\\_en\\_oferta\\_de\\_servicios\\_de\\_Telecomunicaciones\\_Profeco.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/551880/Evolucion_y_Cambio_en_oferta_de_servicios_de_Telecomunicaciones_Profeco.pdf)
- PROMTEL. (2016). *Contrato de Asociación Público-Privada*.
- PROMTEL. (2018). *Adjudicación El proyecto de Red Compartida fue adjudicado por medio del concurso de Licitación Pública Internacional*. 8–10. <https://www.gob.mx/promtel/acciones-y-programas/adjudicacion>
- PROMTEL. (2019). *Evaluación de los Efectos de Corto Plazo de la Red Compartida*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/448830/Eval\\_efectos\\_Red\\_Compartida.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/448830/Eval_efectos_Red_Compartida.pdf)
- PROMTEL. (2020). *Red Compartida*. 1–9.

<https://promtel.gob.mx/paginainicio/redcompartida/#/proyecto>

R3D. (2021). *La neutralidad de la red es clave en el escándalo de whatsapp*. 1–4.

<https://r3d.mx/2021/01/18/la-neutralidad-de-la-red-es-clave-en-el-escandalo-de-whatsapp/>

Redes, A. (2020). A Itán cumple con su segundo hito de cobertura poblacional ; alcanza el 50 . 18 % de los habitantes. *Boletín de Prensa*, 4–5.

<https://www.altanredes.com/altan-cumple-con-su-segundo-hito-de-cobertura-poblacional-alcanza-el-50-18-de-los-habitantes-del-pais-bajo-la-tecnologia-4-5g-lte-advanced/>

SCT. (2018). *Mexico Conectado*.

SCT. (2019). *La SCT diseña el Programa Internet para todos : Salma Jalife*. 7–9.

<https://www.gob.mx/sct/prensa/la-sct-disena-el-programa-internet-para-todos-salma-jalife?idiom=es>

SCT. (2020). Evaluación de la Red Compartida 2020. In *Gobierno de México* (Vol. 53, Issue 9).

[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/604427/Evaluaci\\_n\\_de\\_la\\_Red\\_Compartida\\_2020\\_Versi\\_n\\_FINAL\\_P\\_BLICA\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/604427/Evaluaci_n_de_la_Red_Compartida_2020_Versi_n_FINAL_P_BLICA_.pdf)

SCT. (2021a). Programa de Cobertura Social (PCS 2020-2021). *SCT*, 01(55), 6.

SCT. (2021b). Programa de Cobertura Social (PCS 2020-2021). *Sct*, 01(55), 6.

SECTUR. (2017). *Localidades que cuentan con el nombramiento de Pueblos Magicos*.

Son, P. H., & Son, L. H. (2019). Governing mobile Virtual Network Operators in developing countries. *Utilities Policy*, 56(February 2018), 169–180.

<https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.01.003>

Souter, D., & Spuy, A. van der. (2019). *UNESCO's Internet universality indicators: A framework for assessing internet development*.

<https://en.unesco.org/internetuniversality>

The CIU. (2020). *Despliegue de 5G en Latinoamérica: Los Impactos Previsibles de COVID-19*. 0, 1–11. <https://www.theciu.com/publicaciones-2/2020/5/24/despliegue-de-5g-en-latinoamrica-los-impactos-previsibles-de-covid-19>

Vela, D. S. (2021). Juez admite solicitud de Altán Redes de entrar en Concurso Mercantil. *El Financiero*, 1–7. <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/2021/08/02/juez-admite-solicitud-de-altan-redes-de-entrar-en-concurso-mercantil/>

Villa, T., & Ewald, N. (2016). A Statistical Framework to Monitor the Quality of Service in Mobile Networks. In *IFT* (p. 2016). <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Statistical-Framework-to-Monitor-the-Quality-of-Villa-Ewald/9dd95613bb7e7fd2c1f532e5ea6e8374b2570d54>

## Anexo 1. Municipios

El listado de municipios se obtuvo de INEGI (2018). La densidad de población por municipio se obtuvo del Centro de Estudios de Desarrollo Regional y Urbano Sustentable (CEDRUS/UNAM), (2019). Como primer paso para la caracterización de la red móvil de los OMR, se obtuvo el promedio de la latitud y la longitud de todas las observaciones pertenecientes al mismo nodo de los datos de *crowdsourced* por medio de la función *geoinpoly* de Stata. Posteriormente, se realizó un *merge* con la base de datos que contenía la densidad de población. Finalmente, para mapear la información se utilizaron los *shapefiles* del INEGI. Logrando tener disponible la información de 2,458 municipios de México. Los datos de *crowdsourced* fueron filtrados por operador, realizando de esta manera 4 análisis distintos, los cuales fueron comparados posteriormente.

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Distribución del mercado (con respecto al número de líneas).....	8
<b>Figura 2</b> Índice de precios de los servicios de telefonía móvil antes de la Reforma de Telecomunicaciones (2011 a 2013) .....	12
<b>Figura 3</b> Índice de precios de los servicios de telefonía móvil después de la Reforma de Telecomunicaciones (2013 a 2018) .....	12
<b>Figura 4</b> Índice de precios de los servicios de telefonía móvil (2018 – 2019).....	13
<b>Figura 5</b> Distribución del espectro LTE en México .....	17
<b>Figura 6</b> Mapa de recolección de las medidas de velocidad del operador 1 .....	25
<b>Figura 7</b> Tratamiento de los datos. ....	25
<b>Figura 8</b> Metodología utilizada.....	26
<b>Figura 9</b> Histograma de mediciones de RSRP por operador.....	29
<b>Figura 10</b> Correlación lineal de la cantidad de personas con teléfono celular(X) del censo 2010 y la cantidad de celdas por m <sup>2</sup> (Y) por municipio por operador en México. ....	35
<b>Figura 11</b> Correlación lineal de la cantidad de personas con teléfono celular(X) del censo 2020 y la cantidad de celdas por m <sup>2</sup> (Y) por municipio por operador en México. ....	36
<b>Figura 12</b> Metodología utilizada en la investigación .....	38
<b>Figura 13</b> Clasificación de los municipios de México por geotipo.....	40
<b>Figura 14</b> Estrategias de despliegue de los operadores por banda de frecuencia. ...	43
<b>Figura 15</b> Densificación de la red del operador 1 .....	46
<b>Figura 16</b> Densificación de la red del operador 2 .....	47
<b>Figura 17</b> Densificación de la red del operador 3 .....	48
<b>Figura 18</b> Densificación de la red del operador 4 .....	49
<b>Figura 19</b> Uso de la banda de 1700 - 2100 MHz (AWS) del operador 1 .....	51
<b>Figura 20</b> Uso de la banda de 2500 MHz del operador 1 .....	52
<b>Figura 21</b> Uso de la banda de 1700 - 2100 MHz (AWS) del operador 2 .....	53
<b>Figura 22</b> Uso de la banda de 800 MHz del operador 2 .....	54

<b>Figura 23</b> Uso de la banda de 1900 MHz (PCS) del operador 3 .....	55
<b>Figura 24</b> Uso de la banda de 700 MHz del operador 4 .....	56
<b>Figura 25</b> Distribución geográfica de los <i>clusters</i> del operador 1 .....	57
<b>Figura 26</b> Distribución geográfica de los <i>clusters</i> del operador 2 .....	58
<b>Figura 27</b> Distribución geográfica de los <i>clusters</i> del operador 3 .....	59
<b>Figura 28</b> Distribución geográfica de los <i>clusters</i> del operador 4 .....	61

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Políticas públicas analizadas. ....	10
<b>Tabla 2</b> Indicadores de calidad de la red. ....	23
<b>Tabla 3</b> Variables relevantes de entrada de Network Cell Info .....	25
<b>Tabla 4</b> Observaciones recolectadas .....	28
<b>Tabla 5</b> Comparativa del rendimiento de las variables de velocidad .....	29
<b>Tabla 6</b> Variables principales .....	32
<b>Tabla 7</b> Geotipos.....	40
<b>Tabla 8</b> Características de los <i>clusters</i> del operador 1 .....	58
<b>Tabla 9</b> Características de los <i>clusters</i> del operador 2 .....	59
<b>Tabla 10</b> Características de los <i>clusters</i> del operador 3 .....	60
<b>Tabla 11</b> Características de los <i>clusters</i> del operador 4 .....	61
<b>Tabla 12.</b> Relación entre la política pública y los resultados obtenidos. ....	63