

Efectos económicos de la Regulación del Roaming automático nacional en Colombia.

Luis Carlos Ricaurte
Candidato a Magíster en Economía Aplicada
Universidad de los Andes, Colombia
l.ricaurtel@uniandes.edu.co

Abstract

La presente investigación evalúa el efecto de la Resolución CRC 6298 de 2021, la cual definió los valores tope para la remuneración para la remuneración del servicio de *Roaming* Automático Nacional (RAN) en 460 municipios en Colombia, seleccionados según su nivel de competencia y desarrollo de la infraestructura, dejando el resto de los municipios bajo condiciones de negociación entre los operadores. El análisis se centra en establecer el impacto de esta medida regulatoria sobre la evolución del tráfico de datos móviles y la expansión de infraestructura con tecnología de acceso 4G, en un mercado con estructura oligopólica, caracterizado con la presencia de operadores entrantes y un operador dominante. El RAN es una herramienta que facilita el desarrollo de acuerdos de compartición de infraestructura, lo que permite a los operadores ampliar su cobertura hacia zonas donde no cuentan con ella. Esta medida, implementada por autoridades regulatorias nacionales (ARN), busca disminuir las barreras de entrada al mercado de telecomunicaciones y fomentar mayores niveles de competencia. Dada la endogeneidad derivada de la selección de municipios donde aplica la tarifa regulada, en esta investigación se propone una estrategia de identificación basada en el método de diferencias en diferencias (DiD) combinado con una lógica de regresión discontinua (RD). En primer lugar, se delimita la muestra de municipios en función de su proximidad a los puntos centrales (medoides) de cada clúster, lo que permite identificar aquellos clasificados como regulados que están próximos al grupo de municipios no regulados, y viceversa. Este enfoque emula el proceso de RD, ya que identifica un punto de corte en la distancia a partir del cual existe un cambio en la probabilidad de pertenecer al grupo de municipios regulados. Esto permite la selección de un grupo contrafactual comparable, lo que asegura un diseño de investigación creíble y consistente con los supuestos de identificación causal. Posteriormente, dentro de esta muestra delimitada, se emplea el método DiD para estimar el efecto tratamiento promedio local de la regulación, capturando el impacto de la Resolución CRC 6298 de 2021 en los municipios tratados. Los resultados encontrados muestran que el tamaño de la población y la dimensión del área geográfica son importantes normalizar los variables y evidenciar el supuesto de tendencias paralelas. Este hallazgo arroja indicios sobre la relevancia de estos factores en la implementación de las estrategias de competencia en mercado de servicios de comunicaciones móviles, así como para el diseño políticas públicas. En términos relativos del tamaño geográfico de cada municipio dividido sobre la población, se encuentra un incremento del 46,8% de los sitios con tecnología 4G y 57,6% en los sectores de esta misma tecnologías en los municipios de tarifa negociada, en donde se aumenta el costo de oportunidad del uso del RAN, mientras que en los municipios de tarifa regulada se observa un incremento del 7,8% en el tráfico per cápita de datos móviles en RAN dos años después de la entrada en vigor de la resolución, lo que sugiere un aumento de la competencia en servicios en estos municipios.

JEL codes: L51, L96, C23, D43, O18

Keywords: Regulación en Telecomunicaciones, Competencia de Mercado, Diferencias en Diferencias, Regresión Discontinua, Política Pública en Telecomunicaciones, Infraestructura Móvil.

1. Introducción

El sector de las telecomunicaciones se caracteriza por ser intensivo en capital, ya que depende en gran medida de la disponibilidad de infraestructura tecnológica necesaria para la provisión tanto de los servicios fijos y como móviles (Marckard, 2011; Sinton & Teufel, 2011). Este sector requiere de un diseño de infraestructura en red que implica la instalación de elementos interconectados y geográficamente distribuidos, licencias de uso de frecuencias del espectro radioeléctrico en el caso de los servicios móviles, así como de la disposición de un gran núcleo o estaciones centralizadas con elementos redundantes para garantizar la continuidad del servicio, lo cual genera una alta participación de los costos fijos en la estructura de costos totales (Repkine, 2009; Bhangu, 2020).

Para mantener la competitividad, los proveedores de redes y servicios de telecomunicaciones móviles (PRSTM) deben realizar inversiones considerables tanto en el despliegue infraestructura como en la actualización tecnológica de sus equipos (De-Antonio et al., 2006). Las mejoras en competitividad de los operadores derivadas de la inversión se dan a través de dos vías: i) la expansión de la cobertura de sus redes; y ii) el reemplazo de equipos obsoletos debido a la evolución tecnológica por otros de mayor rendimiento¹ (Segupta & Fanchon, 2009; Repkine, 2009; Sahoo & Sahoo, 2022). Bajo esta perspectiva, la noción de intensidad de capital es esencial para el dinamismo y la competencia en el sector, lo que da lugar a una estructura de mercado oligopolista (Valaskova, et al., 2019; Saha, et al., 2022).

Según Laffont y Tirole (2000), Armstrong (2002) y Cave (2006) en este tipo de estructura de mercado, caracterizado por altos costos fijos, la intensidad del capital en las telecomunicaciones se constituye en una barrera de entrada importante que puede afectar los niveles de competencia. Esta barrera puede conducir a la concentración del mercado y a una reducción de la eficiencia (Duvall & Ford, 2001). De acuerdo con Silva e Meirelles (2010); Park (2009) y Hawthorne et al. (2016), entre las estrategias de competencia para superar las barreras de entrada los PRSTM pueden incluir campañas que se centran en la reputación, la lealtad del cliente, la innovación y las economías de escala, según el nivel de intensidad de capital y la escala de las operaciones.

Por otro lado, los costos de infraestructura y los beneficios de la regulación en un mercado concentrado han sido extensamente analizados, destacando cómo una regulación adecuada puede compensar estas barreras (Bijl & Peitz, 2002). En este contexto, las autoridades regulatorias nacionales (ARN) pueden establecer reglas con el propósito de desarrollar acuerdos entre distintos operadores para la compartición de elementos de infraestructura pasiva², tales como torres, postes, ductos e infraestructura soporte para equipos de transmisión; así como compartición de infraestructura activa, como equipos de conmutación, equipos de transmisión de señales, servidores y centros de procesamiento de datos, entre otros elementos (ITU, 2016).

La compartición de infraestructura surge como una estrategia para reducir costos, particularmente en mercados emergentes (Meddour et al., 2011). La regulación de acceso a infraestructuras compartidas, como sugiere Briglauer (2014), es esencial para equilibrar la competencia y la inversión en el sector. Bajo este marco, las ARN pueden considerar la implementación de medidas que faciliten el acceso a infraestructura existente, permitiendo a nuevos participantes utilizar elementos de red ya desplegados con el propósito de reducir los costos iniciales de ingreso al mercado (ITU & World Bank, 2022; GSMA, 2019).

¹ Adicionalmente, el sector de las telecomunicaciones exhibe una relación compleja entre el nivel de intensidad del capital y tamaño de la firma con las economías de escala, las economías de alcance y las economías de densidad de redes (CRC, 2016). Sin embargo, estas relaciones no son objeto de discusión en el presente artículo.

² La infraestructura del sector de telecomunicaciones se puede dividir en elementos pasivos y activos. La infraestructura activa incluye equipos electrónicos como estaciones base, antenas y transceptores, mientras que la infraestructura pasiva comprende elementos no electrónicos como torres, refugios y fuentes de alimentación (Geddani et al., 2010).

Sin embargo, la evidencia sobre los efectos de la regulación en inversión y competencia en este sector es mixta (Hausman, 1997; Grajek & Röller, 2012). Por ejemplo, la compartición de infraestructura generalmente reduce los precios y aumenta el excedente del consumidor (Jeanjean, 2022), sin embargo, su impacto en la inversión es complejo. Wang & Sun, (2022) sugieren que una profunda compartición de infraestructura combinada con una intensa competencia puede reducir los incentivos a la inversión. De forma análoga Jung et al., (2008) encuentran que el aumento de la competencia puede influir positivamente en la inversión.

Por su parte, Choudhary et al., (2009) señala que compartir infraestructura puede generar importantes ahorros de costos para los operadores y Mölleryd & Markendahl (2013) indican que potencialmente puede mejorar la cobertura y los servicios. La relación entre precios e inversiones en fusiones, en donde los operadores comparten los elementos de su red, muestra un equilibrio entre eficiencia estática y dinámica (Grajek et al., 2019). Los enfoques regulatorios como la "Escalera de Inversiones" intentan equilibrar la competencia basada en servicios a corto plazo con la competencia basada en infraestructuras a largo plazo (Manganelli & Nicita, 2020). Estos resultados mixtos resaltan la necesidad de plantear políticas de competencia eficaces por parte de las ARN y las entidades administrativas del sector.

En este contexto, el *Roaming* Automático Nacional (RAN)³ se enmarca en las medidas de compartición de infraestructura activa a través del cual los PRSTM comparten elementos de acceso a la red⁴, tales como estaciones base y sectores, excluyendo la frecuencia del espectro radioeléctrico, para que los usuarios finales puedan tener continuidad del servicio en áreas geográficas en donde su operador no cuenta con infraestructura (BEREC, 2019). El servicio de RAN permite a los nuevos participantes en la industria de las telecomunicaciones aprovechar de manera eficiente la infraestructura de redes ya establecida por operadores incumbentes (Sabella et al, 2014; Cave & Marsden (2018); Santos et al., 2019; Santos et al., 2020).

Esta estrategia no solo contribuye a ampliar la cobertura de servicios para los usuarios finales, sino que también reduce la necesidad de que los nuevos competidores realicen inversiones significativas en infraestructura propia desde el principio, a la vez que busca fomentar la competencia basada en servicios para los consumidores (Misur, 2021). Las ARN pueden respaldar esta medida estableciendo condiciones técnicas y tarifas remuneratorias para el desarrollo del RAN, lo que permite asegurar que los operadores entrantes de servicios de telecomunicaciones móviles tengan un acceso efectivo, transparente y no discriminatorio a la infraestructura existente, a la vez que los operadores incumbentes optimizan el uso de su red, lo que permite mejorar las condiciones para su amortización.

Siguiendo la representación realizada por la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) (2020), en la Ilustración 1 se observa una representación gráfica del RAN. Los contornos de color rojo y amarillo indican el área de cobertura de dos PRSTM respectivamente, sobre la cual tienen

³ Este acrónimo no debe ser confundido con su homólogo del inglés *Radio Access Network* (RAN), el cual hace referencia a los elementos de la red que conectan a los dispositivos móviles de los usuarios con el núcleo de la red. Para mayor precisión, el término *Roaming* Automático Nacional es conocido en inglés como *Multi-operator Radio Access Network*, *MORAN*, o como *Radio Access Network as a Service*, *RANaaS*. Sin embargo, es importante precisar que *Roaming Automático Nacional* es el término empleado por la Comisión de Regulación de Comunicaciones de Colombia para definir el servicio mayorista de acceso en Colombia. Ver Título I “Definiciones” de la Resolución CRC 5050 de 2015 disponible en: http://normograma.crc.com.gov.co/crc/compilacion/docs/resolucion_crc_5050_2016.htm

⁴ Los elementos de acceso a la red incluyen tecnologías como estaciones base, antenas y celdas (ITU, 2014). Estos elementos permiten la transmisión de datos entre los dispositivos móviles de los usuarios y el resto de la red, a través de la frecuencia del espectro radioeléctrico. En la sección Anexos de este documento se presenta la Ilustración 15, la cual muestra gráficamente un esquema básico de los elementos de red de los servicios de telecomunicaciones móviles. Para el caso de los elementos de acceso de una red 4G estos pueden ser llamados con el término técnico “estaciones base eNodeB” (evolved Node B) (ITU-T, 2015). Con el propósito de facilitar la comprensión de este término en el presente artículo se hará referencia al término estación base 4G para señalar al conjunto de elementos pasivos y activos necesarios para la prestación de servicios móviles en esta tecnología, y al término “sector 4G” para indicar la antena direccional que brinda cobertura en una zona geográfica específica para gestionar el tráfico cursado por los usuarios. Otro concepto importante a tener en cuenta es el que hace referencia al lugar geográfico donde se ubica la infraestructura. Este punto es denominado con el nombre de sitio. El sitio indica una ubicación en donde pueden estar una o varias estaciones base, elementos pasivos como torres o mástiles, elementos activos como antenas, unidades de radio y equipos de transmisión (ITU, 2019).

alcance para la prestación de los servicios móviles de voz, SMS⁵ y datos. Bajo acuerdos de RAN, el proveedor de cobertura en el contorno rojo puede ofrecer continuidad del servicio a sus usuarios en la zona 3, y el proveedor con cobertura en el contorno amarillo puede ampliarla hacia la zona 1.

Ilustración 1. Representación de la cobertura de dos PRSTM.



En Colombia, la CRC reguló los acuerdos de RAN por medio de la Resolución CRC 6298 de 2021, en la cual se establecen las condiciones de remuneración y el ámbito geográfico de aplicación de la tarifa regulada de este servicio (CRC, 2021). Dicho acto administrativo mantuvo los valores tope regulados que se establecieron con la Resolución CRC 5107 de 2016 para la remuneración del uso de la infraestructura de red⁶ necesaria para cursar el tráfico de datos móviles bajo la modalidad de *Roaming* Automático Nacional, la cual en el año 2021 ascendía a \$7,47 por *Megabyte* cursado por operadores entrantes y \$13,85 para operadores establecidos⁷. Adicionalmente, modificó la regla de aplicación de la tarifa regulada por ámbito geográfico al establecer un listado de 460 municipios segmentados a partir de una metodología de clusterización, mientras que la tarifa de remuneración para el resto de los 661 municipios del país quedó sujeta a negociación entre los operadores.

En contraste, con la reforma regulatoria realizada en el 2021 se modificó la aplicación de la tarifa regulada del RAN, permitiendo distinguir entre municipios según su nivel de competencia y el despliegue de infraestructura, de tal manera que, el ámbito de la tarifa regulada del RAN se convierte en una decisión exógena que disminuye los incentivos para limitar la inversión en infraestructura. Bajo este nuevo escenario, se esperaría un aumento en la necesidad de mejorar el despliegue de redes en los municipios de tarifa negociada, debido al incremento en el costo de oportunidad asociado al uso de las redes ya desplegadas al contemplar un área geográfica determinada en donde la tarifa es establecida como producto de la negociación entre los operadores.

La segmentación geográfica para la aplicación de la tarifa regulada se deriva de un proceso de clusterización híbrido, que combina la metodología *k-means* y *k-medoides*, con el propósito de identificar aquellos municipios en donde se presenta un menor desarrollo en términos de las

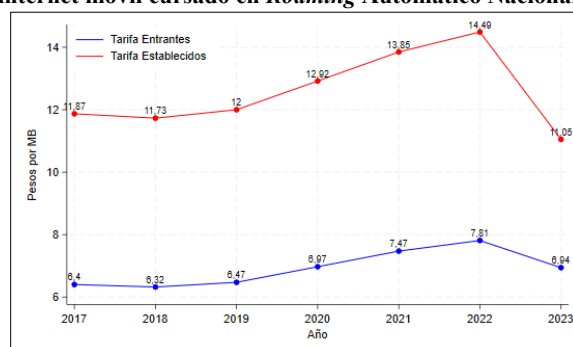
⁵ Mensaje de texto o servicios de mensajes cortos, SMS (por las siglas del inglés *Short Message Service*).

⁶ Para el cálculo de la tarifa de remuneración del RAN y de otros cargos, la CRC empleó un modelo de empresa eficiente móvil que incorpora los elementos tecnológicos y de diseño de red, permitiendo costear la infraestructura de acceso de 2G/3G/4G, red de transmisión, red núcleo, entre otros componentes, junto con los gastos en gestión administrativa, recursos humanos y a las operaciones de la empresa (CRC, 2016). A partir de la información del dimensionamiento de una empresa eficiente móvil, utiliza el enfoque basado en la metodología de costos incrementales de largo plazo (*LRIC* por sus siglas en inglés) para calcular el valor regulado del RAN.

⁷ Esta regulación también mantuvo la tarifa de remuneración de los servicios de voz y SMS. Es importante aclarar que este documento se centra en el servicio de internet móvil, dada la prevalencia de dicho servicio sobre los servicios de voz móvil y SMS.

dimensiones que agrupan a las variables empleadas para la clasificación (CRC, 2020). Este menor desarrollo indica una mayor complejidad para el despliegue de infraestructura móvil, lo que puede limitar la competencia de servicios móviles entre los PRSTM. Bajo esta lógica, se interpreta que la tarifa regulada del RAN permite a los operadores de menor escala replicar ofertas de los grandes competidores y asegurar la competencia en infraestructura y servicios, a la vez que priorizan las inversiones y aumenta el uso de los elementos de las redes bajo una visión de optimización de los recursos escasos.

Ilustración 2. Valor de Remuneración del tráfico de internet móvil cursado en *Roaming Automático Nacional*⁸



Fuente: CRC, Postdata (2024).

Este documento evalúa el efecto de la regulación del RAN sobre las estrategias de competencia basada en infraestructura, es decir, sobre el despliegue de elementos de red de acceso con tecnología 4G, y sobre la estrategia basada en la oferta servicios de internet móvil de los PRSTM. Es importante tener en cuenta que la Resolución CRC 5107 de 2017, la cual antecedía a la resolución objeto de evaluación, acotaba la aplicación de la tarifa regulada a aquellos municipios en donde los operadores contaran con 3 o menos sectores desplegados en tecnologías 4G, para el caso del servicio de datos móviles. Así las cosas, se retringía el uso del *roaming* regulado bajo un enfoque diferencial en función de los planes de inversión de cada operador.

Así mismo, otro efecto esperado de la medida es la promoción de la competencia basada en servicios en los municipios de tarifa regulada, reflejado en el aumento del tráfico de internet móvil cursado en RAN, ya que los operadores, al poder acceder a las redes desplegadas por otros competidores a un costo regulado, pueden ofrecer mejores servicios y expandir su cobertura en zonas donde previamente no tenían presencia. Este escenario también podría mejorar la experiencia del usuario final, al facilitar el acceso a servicios de internet móvil en zonas de baja inversión y contribuir al aumento de la conectividad general del país. Bajo este contexto, las preguntas principales que aborda esta investigación son:

- ¿Cuál es el impacto de la regulación del RAN sobre la inversión en infraestructura 4G en los municipios con tarifas negociadas y reguladas?
- ¿Cómo afecta la implementación del RAN regulado y negociado la competencia entre operadores móviles en función del tráfico de internet móvil cursado en diferentes mercados?

Para abordar estas preguntas se cuenta con un panel de datos de la infraestructura de servicios de telecomunicaciones móvil por municipio entre los años 2018 y 2023 reportada por los PRSTM, de tal manera que incluye información de los periodos anteriores y posteriores a la entrada en vigor de la Resolución CRC 6298 de 2021. También, se cuenta con la información de tráfico anual de internet móvil como medida del desempeño de la penetración del RAN en cada municipio. Adicionalmente,

⁸ La disminución de la tarifa de remuneración del servicio de datos móviles observada en el año 2023 se debe a la actualización realizada mediante la Resolución CRC 7007 de 2022.

se agrega información que permite caracterizar los municipios como el tamaño de la población y la dimensión del área geográfica, variables que son relevantes para las decisiones de despliegue de infraestructura por parte de los operadores (Werner & Porczek, 2019; Syamkumar, et al., 2018; Maniadakis & Varoutas, 2010).

Este documento propone una estrategia de identificación basada en el método de Diferencias en Diferencias (DiD) combinado con la lógica de regresión discontinua (RD). Para lograr esta aproximación, se delimita la muestra de municipios según su distancia a los puntos centrales (medoides) de cada clúster, lo que permite identificar aquellos municipios clasificados como regulados que están próximos al grupo de municipios no regulados, y viceversa. Este enfoque facilita la selección de un grupo contrafactual que emula el proceso de RD, ya que identifica un punto de corte en la distancia a partir del cual se observa un cambio en la probabilidad de pertenecer al grupo de municipios regulados, de tal forma que se asegura un diseño de investigación creíble para la estimación de la inferencia causal bajo supuestos transparentes (Cattaneo & Escanciano, 2017; Bartalotti & Brummet, 2017),

Posterior a la identificación de municipios comparables se corre el método DiD para establecer el efecto tratamiento promedio local⁹ de la regulación. En este marco, el método de diseño RD, explota las discontinuidades en la asignación de tratamientos basándose en una variable continua (Hahn et al., 2001; Van Der Klaauw, 2010) y los beneficios del modelo DiD, permiten comparar los cambios a lo largo del tiempo entre los grupos de tratamiento y control (Greene y Liu, 2020; Lechner, 2011).

Es preciso aclarar que dado el proceso de segmentación desarrollado no se cumple con el supuesto de continuidad en las variables explicativas alrededor del punto de corte exigido en el método de RD (Calonico, et al., 2017; Hill, et al., 2017), debido a que la minimización de las diferencias de los elementos con respecto al punto central de cada grupo, centroide o medoide, limita las observaciones alrededor del punto de corte construido. Este hallazgo abre la puerta a la discusión dado que el incumplimiento del segundo supuesto de identificación no es resultado de la manipulación de la selección de los grupos, como se busca evitar en el RD, sino que es el resultado del mismo proceso metodológico.

Esto genera la necesidad de profundizar en el estudio de la comparabilidad de las observaciones bajo un escenario de segmentación de grupos por clusterización. Es importante resaltar que, a conocimiento de este autor, no existe referentes en la literatura que permitan valorar la eficiencia de los estimadores que resultan de este ejercicio, así como del estudio de pruebas de validez para examinar la precisión del efecto causal sobre las variables resultado.

A partir de la aproximación metodológica propuesta se identifican efectos locales significativos para el grupo de municipios de tarifa regulada frente a los de tarifa negociada en relación con las estrategias de competencia de los PRSTM. En particular, se encuentra que, para el grupo válido de contraste, la Resolución CRC 6298 de 2021 promovió la reasignación de recursos por parte de los operadores hacia los municipios de tarifa negociada, en donde se espera un aumento del costo de oportunidad de ofrecer servicios móviles a través de RAN. Entre el 2021 y 2023, se observa un incremento del 46,8% de los sitios con tecnología 4G y 57,6% en los sectores de esta misma tecnologías en los municipios de tarifa negociada. También se evidencia que el tráfico total de internet móvil aumenta en 7,8% terabytes, lo que sugiere un aumento de la estrategia de competencia en servicios apalancándose en la modalidad de compartición de la infraestructura de acceso.

En línea con los resultados encontrados, Di Francesco et al., (2015) indica que compartir infraestructura puede trasladar la capacidad de las zonas rurales a las urbanas, lo que permite mejorar la eficiencia de los recursos, aunque advierte que la regulación de la competencia puede limitar la

⁹ Efecto LATE por sus siglas en inglés (*Local average treatment effect*).

distribución de beneficios. En contraste, Kim et al. (2010) señala que la regulación del acceso y la compartición voluntaria puede crear desincentivos a la inversión para los PRSTM. En esta misma línea, Grajek & Röller (2012) proporcionan evidencia sobre los efectos negativos de la regulación del acceso sobre la inversión total de la industria y de los operadores individuales en telecomunicaciones.

Por su parte, Frisanco et al., (2008) señala que la compartición presenta desafíos en entornos de múltiples proveedores y de reasignación de activos y ofrece oportunidades para que los PRSTM se centren en factores críticos de éxito y en activos de infraestructura estratégicos. De acuerdo con Meddour et al., (2011), en los mercados emergentes, compartir infraestructura puede ayudar a aprovechar los avances tecnológicos y fomentar el acceso asequible a los servicios móviles.

La presente investigación aporta a la discusión de la relación compleja entre la regulación de acceso, inversión y competencia con las políticas del *Roaming* Automático Nacional. En particular, amplía los hallazgos de trabajos previos como los de Grajek y Röller (2012) y Kim et al. (2010), que analizan la relación entre regulación e inversión. Además, propone un enfoque metodológico novedoso que ayuda a mejorar la precisión en la identificación causal y al mismo tiempo abordar posibles factores de confusión en la discontinuidad (Picchetti et al., 2024; Butts, 2021), lo que ofrece un marco replicable para el análisis de políticas públicas en mercados similares.

Por otro lado, este trabajo destaca el papel de la segmentación regulatoria basada en clústeres, de tal forma que contribuye al debate sobre el diseño de políticas que equilibren competencia e incentivos para la inversión, tal como se discute en los estudios de Bourreau et al. (2012) y Briglauer (2014). Finalmente, los hallazgos presentan implicaciones prácticas para la formulación de políticas públicas, al identificar los efectos diferenciales de las tarifas reguladas y negociadas en la inversión en infraestructura y el tráfico de datos, lo que permite aprotar una perspectiva relevante para el diseño de regulaciones adaptativas en mercados en desarrollo.

2. Contexto de política regulatoria del RAN¹⁰

En 2002, la Comisión de Regulación de Telecomunicaciones (CRT)¹¹ adopta el *Roaming* Automático Nacional como una estrategia para promover liberación de servicios de telecomunicaciones, de acuerdo con los procesos de integración de los servicios de telecomunicaciones establecidos por la Comunidad Andina de Naciones¹² (Resolución CRT 469 de 2002). En esta primera intervención, el RAN se estableció como un servicio con el carácter de instalación esencial¹³, lo que implica, como medida para garantizar la competencia, que los operadores incumbentes tienen la obligación de ofrecer acceso a sus redes a otros proveedores de servicios en términos justos, razonables y no discriminatorios, facilitando así la entrada de nuevos competidores al mercado.

Antes de la medida regulatoria objeto de evaluación¹⁴, la regulación de la CRC establecía una senda de valores tope de remuneración del RAN, aplicable solo en aquellos municipios en donde el operador solicitante del servicio tuviera desplegado como máximo 3 sectores de la tecnología 4G en el caso del servicio de datos móviles¹⁵ (Resolución CRC 5107 de 2017). Esta medida tenía como propósito

¹⁰ En la sección de anexo se presenta el listado de las intervenciones regulatorias en materia de *Roaming* Automático Nacional expedidas por la CRC.

¹¹ Hoy Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC)

¹² Hoy Comunidad Andina.

¹³ De acuerdo con la Resolución CRC 5050 de 2016, se considera instalación esencial:

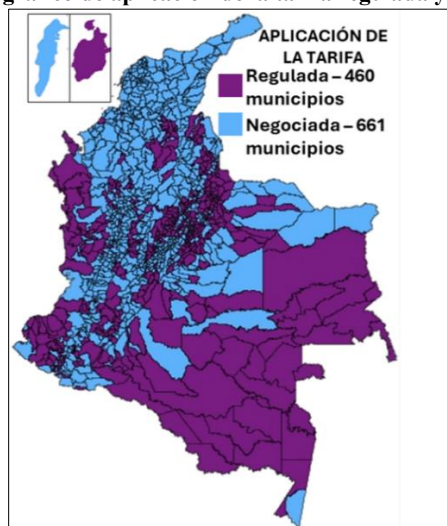
«Toda instalación de una red o servicio de telecomunicaciones que sea suministrada exclusivamente o de manera predominante por un solo proveedor o por un número limitado de proveedores de redes y servicios de telecomunicaciones, y cuya sustitución con miras al suministro de un servicio no sea factible en lo económico o en lo técnico».

¹⁴ En el literal B de la sección Anexos del presente documento se listan las intervenciones regulatorias de la CRC asociadas al *Roaming* Automático Nacional.

¹⁵ De acuerdo con esta misma regulación, para el caso de los servicios de voz y SMS los valores tope de remuneración del RAN aplicaba en aquellos municipios en donde el PRSTM contara con un máximo de 3 estaciones en las tecnologías 2G o 3G.

promover la entrada de nuevos competidores al segmentar el ámbito de aplicación de la tarifa regulada en función de las condiciones de despliegue de la infraestructura específicas de cada operador. Sin embargo, esta condición podría tener efectos sobre los incentivos para expandir su infraestructura más allá de este límite de equipos, puesto que los operadores podrían decidir de forma endógena en qué áreas aplicar la tarifa regulada del RAN.

Ilustración 3. Ámbito geográfico de aplicación de la tarifa regulada y tarifa negociada del RAN.



Con la expedición de la Resolución CRC 6298 de 2021 el ámbito de aplicación de la tarifa regulada del servicio de RAN se delimitó a un listado de 460 municipios, priorizando aquellas áreas con menor despliegue de infraestructura y menor competencia en el mercado de telecomunicaciones. Esta delimitación se basó en un análisis geográfico que tenía como objetivo identificar las zonas donde los operadores enfrentan mayores dificultades para expandir sus redes y, por ende, garantizar la prestación continua del servicio. Además, la CRC buscó incentivar la competencia en estas zonas menos desarrolladas, asegurando que los operadores más pequeños o aquellos con menores recursos pudieran acceder a condiciones regulatorias favorables; esto con el propósito de contribuir a la reducción de brechas digitales y a la mejora de la cobertura en términos de conectividad móvil.

2.1. Análisis geográfico para la aplicación de la tarifa regulada.

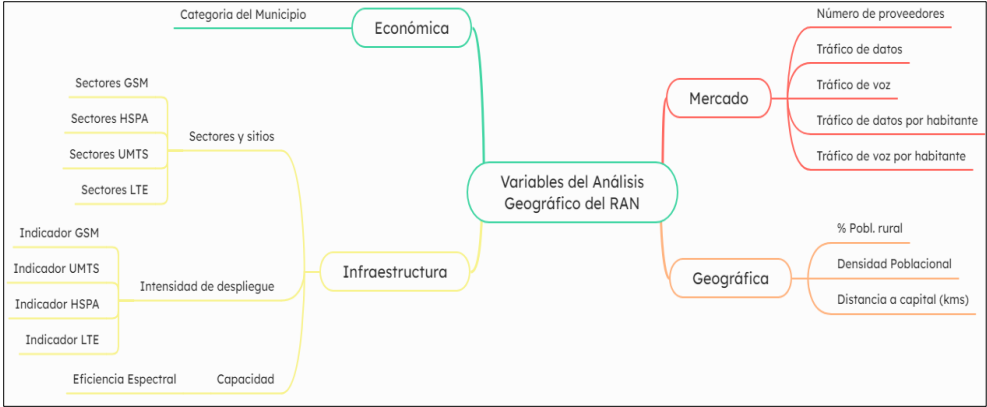
De acuerdo con el Documento Soporte del Proyecto Regulatorio "Revisión de las Condiciones de Remuneración del Roaming Automático Nacional" de la CRC desarrollado en 2020, del cual se derivó la expedición de la Resolución CRC 6298 de 2021, para la construcción del listado de los 460 municipios se implementó un método de clusterización que incluyó 19 variables asociadas a dimensiones relacionadas con la prestación de los servicios móviles. Entre las variables usadas se encuentran la densidad de población, la presencia de redes desplegadas por los PRSTM y el tráfico de datos cursado en cada área (ver Ilustración 4). Además, se consideraron variables asociadas a las condiciones de tipo socioeconómicas y de distancia geográfica para la segmentación el ámbito de aplicación de la tarifa regulada.

El análisis geográfico se basó en la aplicación de dos métodos de clusterización¹⁶: *k-means* y *k-medoids*. Estos métodos sustentaron la agrupación de municipios según sus características en dimensiones relacionadas con infraestructura, mercado, geografía y economía. En el caso del método

¹⁶ En el literal C de la sección Anexos del presente documento se presentan las fórmulas empleadas por el algoritmo de clasificación *k-means* y *k-medoids* respectivamente.

k-means, la CRC usó el cálculo de distancias euclidianas con respecto a los centroides para 5 grupos del clúster. Esta cantidad de grupos fue establecida de acuerdo con el análisis de particiones óptimas; determinado según el método de suma total de cuadrados internos (CRC, 2020).

Ilustración 4. Variables del Análisis Geográfico



Fuente: Tomado de CRC (2020).

Para el caso del método *k-medoids* se estableció un tamaño óptimo de 9 particiones, para los cuales se empleó como medida de similitud el cálculo de la distancia Manhattan con respecto a los *medoids*. En ambos casos, el proceso buscó minimizar la varianza interna de los grupos, es decir, reducir las diferencias dentro de cada clúster para asegurar una mayor homogeneidad, a la vez que maximiza las diferencias entre clústers (Singh & Chauhan, 2011; Nirmal, 2019). La combinación de métodos de clusterización se denomina clúster híbrido (Drias, et al., 2015; Wang, et al., 2018), el cual permite aprovechar sus fortalezas y superar las limitaciones individuales.

Tabla 1. Cantidad de Municipios por agrupación del Clúster Híbrido.

	Grupos del clúster por método <i>K-medoids</i>										
Grupos del clúster por método <i>K-means</i>	Nro. Clúster	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total
	1	3						1			4
	2		174	176	209						559
	3		4	1	1	2	1		65		74
	4		152		4	255	52	20			483
	5									1	1
	Total	3	330	177	214	257	53	21	65	1	1121

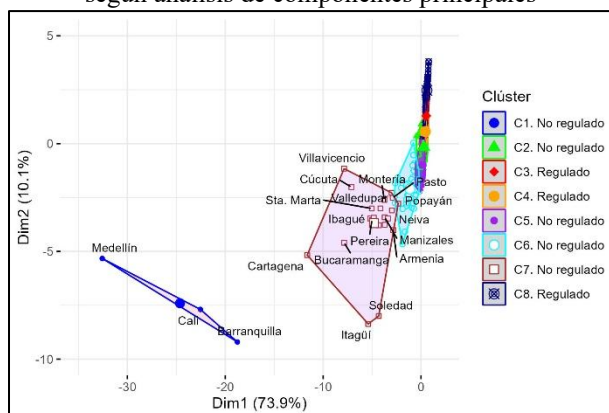
Fuente: Calculado a partir de la información publicada del proyecto regulatorio "Revisión de las Condiciones de Remuneración del Roaming Automático Nacional".

El método híbrido permite aumentar la precisión de los grupos seleccionando la combinación adecuada de clúster establecidos por cada método. La Tabla 1 muestra en las celdas sombreadas los 460 municipios que conforman el ámbito de aplicación de la tarifa regulada a partir de la interacción entre cada uno de los métodos de clusterización. En este ejercicio se puede observar que los grupos 1 y 5 del método *k-means* segmentan solo 5 municipios, mientras el resto de los 1116 municipios se encuentran concentrados en los grupos 2, 3 y 4. Al realizar un cruce con la segmentación de los grupos del método *k-medoids*, los municipios concentrados son distribuidos al interior de los grupos 2, 3, 4 y 8¹⁷ de esta metodología.

¹⁷ Es importante tener en cuenta que los municipios que conforman el ámbito de aplicación de la tarifa regulada se encuentran principalmente determinado por clúster 3, 4 y 8 del método *k-medoids*, en donde se ubican 456 de los 460 municipios identificados, los 4

Los métodos de *k-means* y *k-medoids* con frecuencia son integrados para equilibrar la eficiencia y la solidez del ejercicio de clusterización (Drias, et al., 2015; Islam, et al., 2019). Este método híbrido tiene como objetivo mejorar la precisión de la agrupación, manejar agrupaciones no esféricas y reducir la sensibilidad a los valores atípicos (Zhou & Saeidlou, 2022; Wang, et al., 2018). En el caso de los grupos 1 y 5 del método *k-means*, que segmentan 5 municipios, corresponde a municipios con observaciones atípicas. Al analizarlo desde otra perspectiva, 4 de los 5 municipios antes indicados se logran identificar en los grupos 1 y 9 del clúster del método *k-medoids*, en los cuales están las principales ciudades del país, Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla (ver Ilustración 5).

Ilustración 5. Visualización de los grupos de *k-medoids* según análisis de componentes principales



Nota: Se excluye la ciudad de Bogotá debido a su comportamiento atípico.

De igual manera, al tener en cuenta las dos primeras dimensiones, que resumen la mayor parte de la variabilidad de los datos según el análisis de componentes principales, se observa que el grupo 7 del método *k-medoids*, conformado por 21 municipios, también presenta un comportamiento asimétrico con respecto a la mayoría de los municipios (ver Ilustración 5). Entre estos municipios, 14 son capitales de departamento, como Cartagena de Indias; Manizales; Bucaramanga; Santa Marta; Montería; entre otras. Los 7 restantes corresponden a municipios con alta densidad poblacional e importancia económica relevante para sus regiones¹⁸, estos municipios son: Bello; Envigado; Itagüí; Soledad; Soacha; Floridablanca y Palmira.

Las observaciones atípicas identificadas en el clúster pueden representar un desafío para evaluar el impacto de las medidas regulatorias del RAN, ya que pueden afectar el cumplimiento del supuesto de identificación. En algunos estudios, la selección diferencial de observaciones durante el proceso de agrupamiento puede sesgar las estimaciones del efecto causal si no se consideran adecuadamente estas diferencias (Oesterreich, 2020; Ye, et al., 2024). Los métodos de robustez pueden contribuir a neutralizar el impacto de estos valores atípicos en los procesos de agrupación y evaluar la relevancia de las observaciones (Vellido et al., 2006). Además, la presencia de observaciones atípicas puede influir en las pruebas estadísticas y en los métodos de estimación comunes (Macdonald, 2007). Una manera de superar este problema es implementar un proceso de aleatorización combinado con una selección adecuada por clúster, lo que permite cumplir con los supuestos clave para una estimación precisa del impacto (Fakir, et al., 2020).

En consistencia con lo anterior, el comportamiento atípico de algunas observaciones en el clúster desarrollado demanda de una aproximación metodológica que permita derivar un grupo contrafactual

municipios restante resultan de cruzar el grupo 3 del método *k-means* con el grupo 2 del método *k-medoids*. Esto es importante para el cálculo de las distancias con respecto a los *medoids* de los municipios de tarifa regulada y de los municipios con tarifa negociada.

¹⁸ En el literal D de la sección Anexos del presente documento contiene el listado de municipios que conforman el grupo 7 del método *k-medoids*.

creíble para estimar de manera precisa el efecto causal de la regulación del RAN. El análisis de similitud empleado en la construcción de los grupos del clúster resulta fundamental en este contexto, ya que permite identificar características comunes y diferencias significativas entre las observaciones. Esta aproximación puede facilitar la construcción de grupos comparables y bien balanceados, con el fin de minimizar sesgos y asegurar que las estimaciones del efecto causal de la regulación sean robustas y confiables.

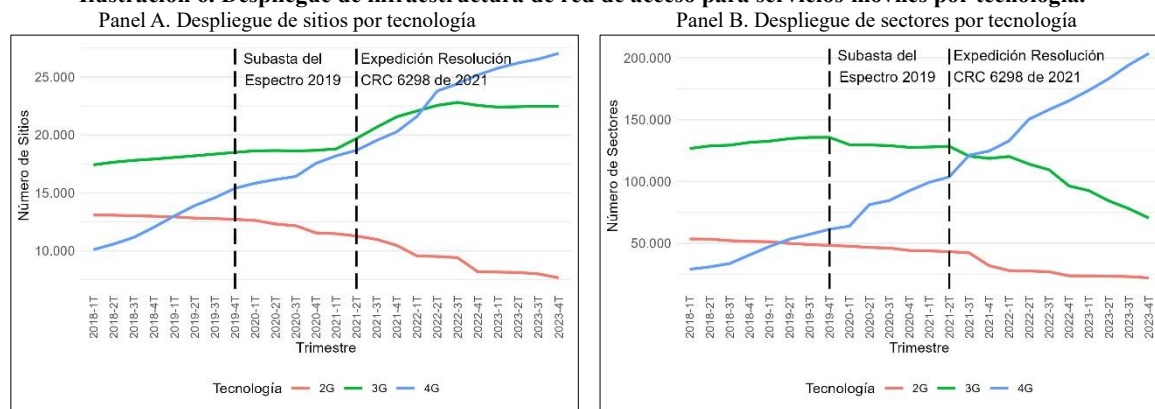
3. Efectos de la Resolución CRC 6298 de 2021

3.1. Datos

Las variables resultado para evaluar la estrategia de competencia basada en infraestructura emplean la información reportada por los operadores sobre el despliegue de elementos de red de acceso¹⁹, particularmente, la asociada al número de sitios que cuentan con tecnología 4G y la cantidad de sectores instalados de la misma tecnología. Es importante aclarar que los operadores móviles virtuales al carecer de elementos de acceso a la red se encuentran excluidos de reportar esta información. En este sentido, esta base de datos cuenta con información agregada a nivel municipal de los operadores²⁰ Claro, Movistar, Tigo, Wom y Avantel, este último hasta antes de su fusión con Wom.

Esta base de datos contiene información anual balanceada de los 1121 municipios de Colombia para el periodo 2018 y 2023, se excluyen 4 municipios que son sujetos de aplicación de la tarifa regulada, pero son producto de la intercepción del grupo 3 del método *k-means* y el grupo 2 del método *k-medoids*²¹. Para la información de sitios y sectores 4G se toma como referencia el promedio anual de la cantidad de elementos desplegados por municipio²².

Ilustración 6. Despliegue de infraestructura de red de acceso para servicios móviles por tecnología.



¹⁹ La información de infraestructura fue suministrada por los PRSTM hasta el primer trimestre del 2021 a través del Formato 7 y 8 de la Resolución MinTIC 3484 de 2013. A partir del segundo semestre del mismo año, esta información ha sido reportada mediante el Formato 3 de la Resolución 175 de 2021. Esta información es procesada y publicada por la CRC a nivel municipal en la página web de publicación de datos abiertos: www.postdata.gov.co.

²⁰ Se utilizarán principalmente los nombres comerciales de los proveedores de servicios de telecomunicaciones móviles para facilitar la comprensión del documento.

²¹ Esta intercepción dificulta el cálculo de las distancias a los *medoids*, teniendo en cuenta que la mayoría de los municipios de su grupo son sujetos de aplicación de la tarifa negociada.

²² Con la entrada en vigor del Formato 3 de la Resolución MinTIC 175 de 2021, se observa una caída en el número de sitios y sectores reportados para la tecnología 4G durante el segundo semestre de 2021, la cual se recupera en el trimestre inmediatamente posterior. Esta disminución podría estar relacionada con la adopción del nuevo formato por parte de los PRSTM. Por esta razón, se imputaron los datos de estas variables utilizando las cifras del trimestre anterior únicamente para aquellos municipios que presentaron dicho descenso. En el literal E de la sección de Anexos, se presenta el contraste gráfico que muestra la tendencia de los sitios y sectores 4G reportados en relación con los valores imputados para el segundo semestre de 2021.

Se hace necesario resaltar que la evaluación se enfocó en el desempeño de la instalación de elementos 4G debido a la prevalencia de esta tecnología. Por un lado, el comportamiento del despliegue muestra una tendencia de crecimiento sostenido en la implementación de la tecnología 4G, mientras que en el caso de los sitios y sectores de las tecnologías 2G y 3G presentan una reducción o estabilización en su despliegue (ver panel A y B de la Ilustración 6). Este comportamiento es consistente con la adopción de tecnologías más avanzadas por parte de los operadores y usuarios. En complemento con la migración tecnológica, los operadores anunciaron el apago progresivo de las redes 2G (CRC, 2022), lo cual se refleja en la disminución tanto de sitios y como sectores para esta tecnología.

Por otro lado, la tecnología 3G, según la definición de fases de mercado, se encuentra en una fase de madurez y comienza a transitar hacia una fase de declive. Este comportamiento es típico de tecnologías que se han convertido en estándar pero que están siendo reemplazadas por versiones superiores. La evolución de los estándares de tecnología móvil sigue un patrón típico de sucesión tecnológica y madurez del mercado. A medida que surgen nuevas generaciones, se difunden en el mercado con el tiempo, compitiendo y eventualmente reemplazando a las versiones anteriores (Norton & Bass, 1987). La transición de tecnología 3G a la 4G ejemplifica este comportamiento: la tecnología 3G entra en madurez a medida que el 4G gana protagonismo (Gupta, 2015). A medida que las tecnologías más nuevas se vuelven dominantes, las más antiguas pueden decaer o adaptarse a aplicaciones específicas (Coopersmith, 2010).

El proceso de evolución tecnológica implica interacciones complejas entre empresas, gobiernos y los organismos que promueven la estandarización tecnológica²³ (Glimstedt, 2001; Stewart, et al., 2011). En esta línea, la subasta de frecuencias del espectro de 700 MHz, 1900 MHz y 2500 MHz, realizada a finales del año 2019 estableció, para los operadores adjudicatarios de dichas frecuencias, compromisos de inversión en 3.658 localidades distribuidas en 619 municipios distribuidos en todos los departamentos del país con el propósito de brindar cobertura en zonas desatendidas (CRC, 2021). En este contexto, se observa un salto de nivel en la tendencia de sectores 4G desplegados a partir del primer trimestre de 2020, el cual es el trimestre inmediatamente posterior a la asignación de dicha subasta. Por tanto, se hace importante considerar los municipios beneficiados por esta medida para estimar el efecto neto de la Resolución CRC 6298 de 2021, ya que esto permitirá evaluar con precisión el impacto de la expansión de la cobertura en estas áreas específicas.

Ahora, para analizar los efectos sobre la estrategia basada en servicio por parte de los PRSTM, se emplea la información de datos móviles se emplea reporte de tráfico cursado a nivel municipal, por usuarios que se encuentran en RAN, de acuerdo con los reportes de información de la CRC²⁴. Para construir esta variable se agregan para cada año los valores mensuales de tráfico para cada municipio, adicionalmente esta información provee el detalle del proveedor de red de origen (PRO) y proveedor de red visitada (PRV), es decir de quien solicita el RAN y quien facilita la infraestructura. Esto permitió corregir el reporte de tráfico que fue realizado por Wom sobre las redes de Avantel durante el proceso de fusión de estas empresas. Como resultado, se cuenta con una base de datos con información de tráfico de internet móvil para 1121 municipio de forma balanceada para el periodo de referencia.

La información de tráfico cursado en RAN fue restringida a los cinco operadores antes mencionados, es decir, no se tuvo en cuenta la información reportada por ETB. Lo anterior, debido a que este operador no desplegó elementos físicos de acceso a la red, a pesar de contar con la concesión de uso

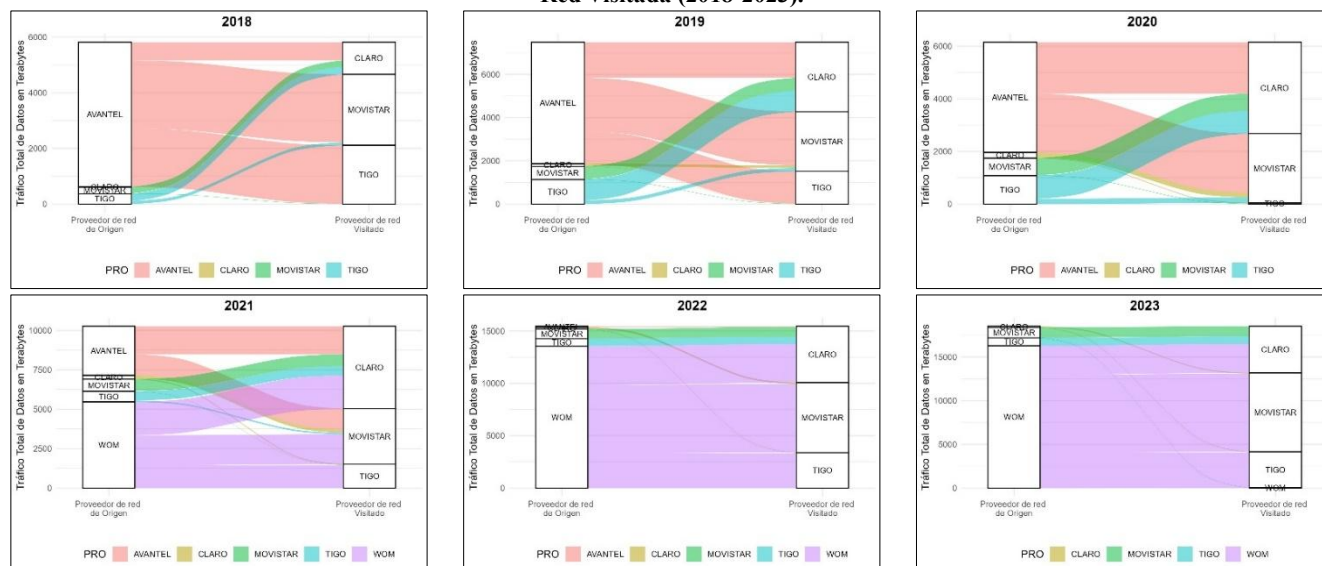
²³ La estandarización tecnológica, promovida por organismos internacionales y regionales en el mercado de servicios de telecomunicaciones, tiene como fin asegurar la interoperabilidad, eficiencia y calidad de los servicios, a través de la emisión de normas, directrices y especificaciones técnicas para el desarrollo y la implementación de tecnologías de telecomunicaciones. Algunos de los principales organismos son: Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI), 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), Comisión Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL), entre otros.

²⁴ Tomada de la página web de publicación de datos abiertos de la CRC: www.postdata.gov.co.

de bandas de frecuencia del espectro radioeléctrico para la operación y prestación de servicios móviles terrestres a través de unión temporal en asociación con Tigo (Resolución MinTIC 2623 de 2013)²⁵. Adicionalmente, se excluye el tráfico reportado inicialmente por Wom como proveedor de red de origen que fue cursado sobre las redes de Avantel, teniendo en cuenta que se llevó a cabo la fusión entre estos dos operadores en el año 2021²⁶.

El análisis de flujo muestra que el origen del RAN está dominado por Avantel, entre el 2018 y 2020, y Wom, a partir de su entrada en operación en 2021. En contraste, las participaciones de los proveedores Tigo, Movistar y, especialmente, Claro, son significativamente inferiores. Por el lado del proveedor de red visitada, se observa un mayor dinamismo en la participación de los PRSTM si se contrasta cada uno de los años. Sin embargo, de forma agregada Claro y Movistar tienen una participación que se encuentra alrededor del 40% en la recepción de tráfico de datos móviles a través de sus elementos de acceso a la red para todo el periodo de análisis, mientras que Tigo tiene el 20% restante.

Ilustración 7. Evolución del Flujo de tráfico datos móviles entre el Proveedor de Red de Origen y el Proveedor de Red Visitada (2018-2023).



Es relevante considerar para esta evaluación que tanto Avantel como Wom, fueron reconocidos como operadores entrantes²⁷, lo cual les permitió beneficiarse de la tarifa regulada aplicable a estos competidores. Esta ventaja tarifaria es un elemento clave en la estrategia competitiva de ambos operadores para optimizar el uso del RAN y reducir los costos asociados a su entrada en el mercado. En este sentido, la alta participación de Avantel y Wom como proveedores de origen en el tráfico de RAN ofrece una visión sobre el impacto de las políticas regulatorias diseñadas para fomentar la competencia y reducir barreras de entrada en el contexto de nuevos actores en el mercado.

Adicionalmente, es importante tener en cuenta que Claro fue declarado, por la Comisión de Regulación de Comunicaciones, como operador dominante al concentrar una alta participación de mercado en términos de usuarios, tráfico e ingresos, lo que se traduce en economías de escala

²⁵ Mediante la Resolución MinTIC 10 de 2022 se autorizó la cesión del permiso de uso del espectro radioeléctrico otorgado a la unión temporal de la que ETB era parte, en favor del permiso de uso para el operador Colombia Móvil S.A. ESP (Tigo).

²⁶ El proceso de fusión por absorción de TELECOM COLOMBIA S.A.S., y AVANTEL S.A.S. fue autorizado por parte de la Superintendencia de Sociedades, mediante Resolución 325009888 del 26 de mayo de 2022, modificada mediante la Resolución 325011534 del 14 de julio del mismo año.

²⁷ Avantel fue reconocido como operador entrante hasta el cuarto trimestre del 2018 (CRC, 2020). Por su parte, Partners Colombia S.A.S (Wom) fue reconocido a partir de su llegada al mercado en el 2020, de acuerdo con la Resolución CRC 6127 de 2020.

significativas que le permiten operar a menores costos que sus competidores (Resolución CRC 6146 de 2021). Este resultado es relevante dado que este operador cuenta con poder significativo de mercado (PSM), lo cual le otorga la capacidad para influir en las tarifas del mercado, en las condiciones de acceso a la red y en la dinámica competitiva general del sector. Su posición dominante le permite ejercer un control significativo sobre la fijación de precios, dificultando la competencia efectiva y la entrada de nuevos operadores al mercado.

En este contexto, el análisis del impacto de la Resolución CRC 6298 de 2021 cobra una mayor relevancia, ya que el RAN es una herramienta de la política regulatoria que busca mitigar los efectos negativos del poder de mercado significativo de operadores, incentivando la competencia a través de condiciones favorables para los operadores entrantes y evitando que la dominancia de un solo actor limite la expansión y competencia en el mercado.

3.2. Tendencias de la inversión en infraestructura y el tráfico de datos.

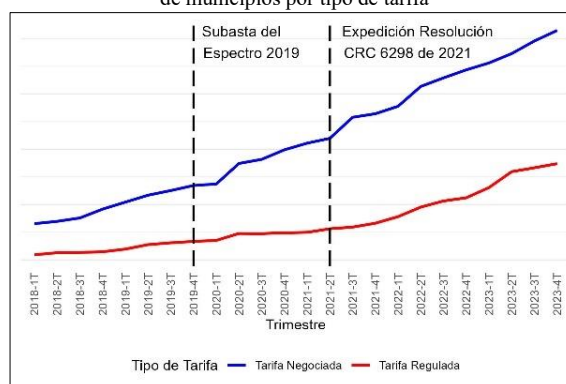
En el análisis de impacto de la Resolución CRC 6298 de 2021 sobre el tráfico de datos móviles cursados sobre RAN y la expansión de infraestructura con tecnología de acceso 4G en el mercado de telecomunicaciones móviles en Colombia, es relevante considerar la evolución temporal de variables objeto de evaluación según el ámbito de aplicación de la tarifa: tarifa negociada versus tarifa regulada. Teniendo en cuenta que, esta evaluación se estructura en el marco de un modelo de diferencias en diferencias (DiD), la identificación de tendencias y puntos de inflexión son elementos importantes para comprender los resultados encontrados.

Ilustración 8. Infraestructura de acceso a la red móvil de tecnología 4G.

Panel A. Sitios 4G por densidad poblacional según clasificación de municipios por tipo de tarifa



Panel B. Sectores 4G por densidad poblacional según clasificación de municipios por tipo de tarifa



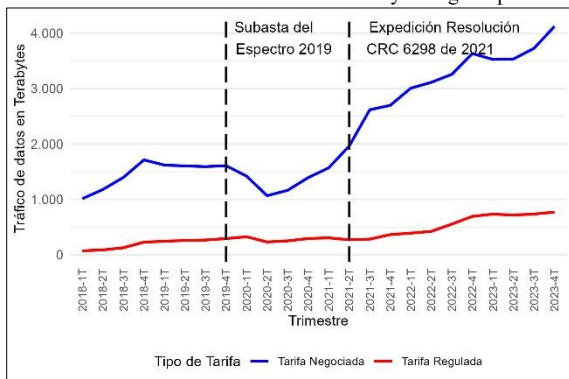
La Ilustración 8 revela que el despliegue de infraestructura en términos de la densidad poblacional, tanto para los municipios con tarifas reguladas como los de tarifa negociadas, presenta una tendencia creciente en las variables de sitios y sectores, especialmente después de la subasta de 2019 y la implementación de la Resolución CRC 6298 de 2021. Este análisis visual permite sugerir que las variables geográficas y poblacionales juegan un papel importante en las decisiones de despliegue de la infraestructura de los servicios de telecomunicaciones en consistencia con lo señalado por DeMaagd (2009), Werner & Porczek, (2019) y Banerjee et al., (2008)

Para el caso del tráfico de datos la identificación de patrones o diferencias significativas entre municipios con tarifas reguladas y negociadas no se hace evidente. La Ilustración 8 muestra las dinámicas de consumo en términos totales y ajustadas por población. El panel A, a diferencia del despliegue de infraestructura, revelan que el comportamiento del consumo de internet móvil no sigue un patrón uniforme entre los dos tipos de municipios, sin embargo, en términos per cápita se encuentra una mayor simetría entre las tendencias, con periodos de divergencia. Por ejemplo, al inicio de la emergencia económica y social generada por el virus COVID 19, se observa una caída en el tráfico

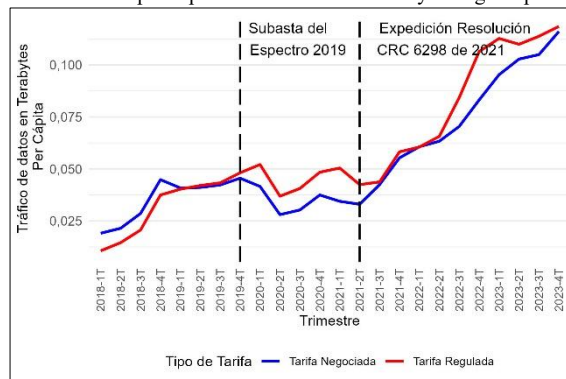
de internet móvil para luego presentar una fuerte aceleración en ambos grupos de municipios, patrón que no se logra identificar al considerar el tráfico agregado para los municipios de tarifa regulada observado en el Panel A.

Ilustración 9. Tráfico de datos móviles cursados en RAN.

Panel A. Total tráfico datos móviles en terabytes según tipo tarifa



Panel B. Tráfico per cápita datos móviles en terabytes según tipo tarifa



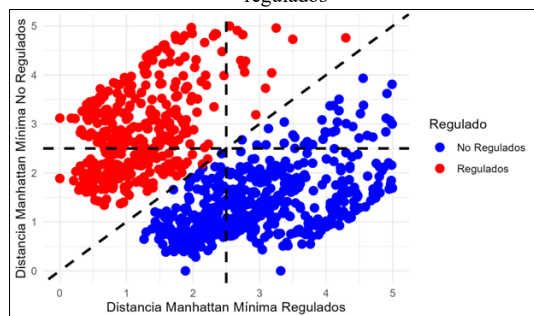
Este análisis muestra que tanto el tráfico de datos móviles como el despliegue de elementos de red de acceso con tecnologías 4G exhiben una relación con variables que caracterizan los mercados y que pueden influir en el diseño e implementación de las estrategias de competencia en servicios o infraestructura. Al controlar por estas características estructurales, es posible aislar y estimar con mayor precisión el efecto neto de las políticas tarifarias, como las diferencias inducidas por la regulación del RAN (*Roaming Automático Nacional*), sobre la infraestructura y el uso de servicios móviles en diferentes contextos. En este sentido, se hace necesario realizar una aproximación de las variables resultado considerando los atributos poblacionales de cada municipio con el propósito de capturar los efectos de la regulación objeto de evaluación.

3.3. Estrategia de identificación.

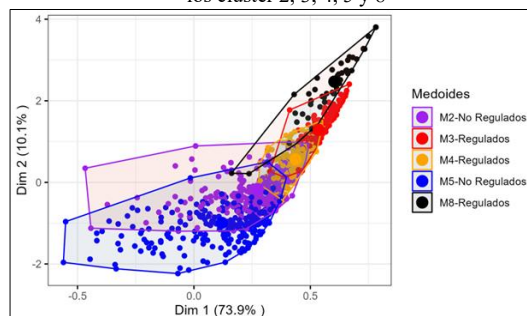
El análisis de componentes principales (ACP), basado en la agrupación mediante el método *k-medoids*, permite visualizar la distribución de los municipios en función de las dimensiones que explican la variación de las 19 variables consideradas en el clúster. Según los resultados del análisis geográfico, para la segmentación del ámbito de aplicación de la tarifa regulada, los municipios del clúster 1, 7 y 9 del método *k-medoids* presentan un comportamiento asimétrico con respecto al resto de los clústers.

Ilustración 10. Distribución de Municipios según clúster por Método *K-Medoids*.

Panel A. Distancia Manhattan a medoides regulados vs no regulados



Panel B. Dispersión de municipios de acuerdo con el ACP para los clúster 2, 3, 4, 5 y 8



En consecuencia, estos municipios representan un desafío para evaluar los efectos de la Resolución CRC 6298 de 2021, dado que presentan características y patrones que dificultan su comparación con

los demás municipios. Esto afecta significativamente el cumplimiento del supuesto de identificación. Por lo tanto, es pertinente excluir estos grupos del análisis para asegurar la validez y robustez de la estrategia de identificación. En la Ilustración 10, se observa la distribución de los municipios sin los municipios del clúster 1, 7 y 9 del método *k-medoids*:

- Panel A: Muestra el cálculo de la distancia Manhattan a los medoides de los municipios regulados versus los no regulados más cercano.
- Panel B: Presenta la dispersión de los municipios en función de las dimensiones principales del ACP para los clústeres 2, 3, 4, 5 y 8, que son los clústeres relevantes para el análisis.

De esta manera, el análisis gráfico revela como el cálculo de la distancia Manhattan respecto al medoide más cercano, tanto para los municipios regulados como para los no regulados, puede sustentar la estrategia de identificación para la evaluación del impacto de la Resolución CRC 6298 de 2021, al aprovechar los resultados de la segmentación de municipios desarrollada a partir la metodología de clusterización. Para calcular dicha distancia se sigue la especificación de la distancia Manhattan:

$$D = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

Donde:

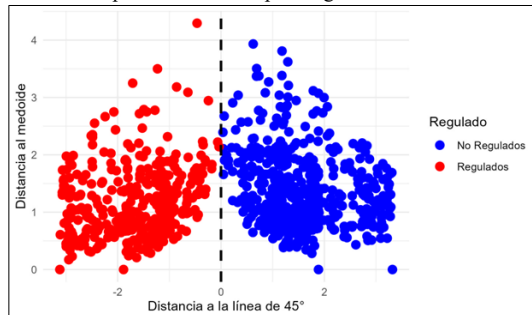
x_i : representa las coordenadas de cada municipio en las variables seleccionadas

y_i : corresponde a las coordenadas del medoide de referencia.

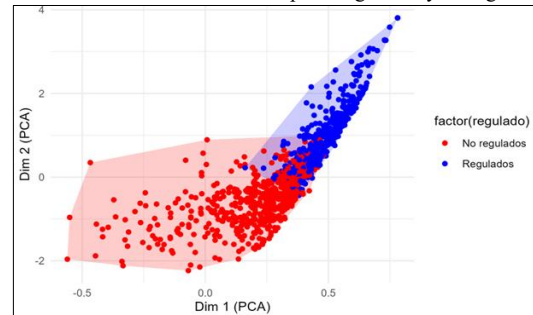
Se observa que, al graficar estas distancias en relación con una línea de 45 grados, los municipios con tarifa regulada se ubican consistentemente en un cuadrante distinto a aquellos con tarifa negociada, sin presentar cruces entre los grupos. Esto indica que ningún municipio con tarifa regulada se encuentra por debajo de esta línea, y viceversa para los municipios con tarifa negociada. Este patrón de distribución permite establecer una discontinuidad clara en la línea de 45 grados, que actúa como un umbral natural para separar a los dos grupos de municipios.

Ilustración 11. Rotación de los Municipios según clúster distancia a línea de 45°.

Panel A. Dispersión de municipios según línea de 45°



Panel B. Contorno de los Municipios Regulados y no regulados.

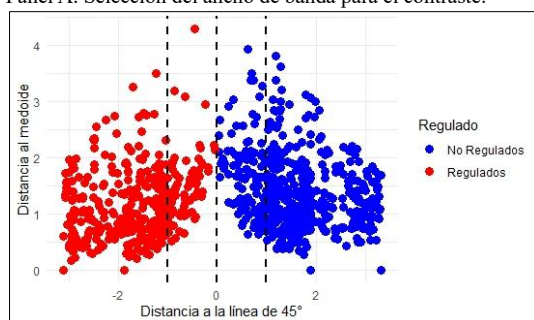


Ahora, la rotación de la distancia Manhattan calculada para cada grupo (regulados y no regulados) con relación a sus respectivos medoides facilita visualizar y confirmar la separación de los municipios en dos grupos distintos, lo que es fundamental para la implementación de la estrategia de identificación (ver Ilustración 11). Bajo este método de aproximación, es posible construir un ancho de banda en torno a la línea de 45 grados que permita identificar de forma robusta los municipios que serán utilizados como contraste, asegurando que cumplan con los supuestos de identificación necesarios.

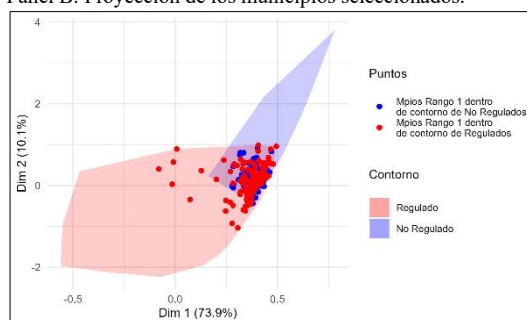
La Ilustración 12 muestra cómo un ancho de banda de una distancia Manhattan permite seleccionar únicamente aquellos municipios que se encuentran próximos a la línea de discontinuidad para ser incluidos en el análisis. Este enfoque facilita la identificación de municipios que sean potencialmente similares en términos de características observables, pero que difieren en la aplicación de la tarifa regulada. Es necesario tener en cuenta que por medio de este método la comparabilidad no está asegurada, dado que una misma magnitud de distancia entre dos municipios no garantiza que sus variables de caracterización sean idénticas o comparables en términos absolutos²⁸.

Ilustración 12. Ancho de banda de una distancia Manhattan a línea de 45°.

Panel A. Selección del ancho de banda para el contraste.



Panel B. Proyección de los municipios seleccionados.



De igual manera, es importante tener en cuenta que bajo este método no es posible cumplir con los dos supuestos de identificación que demanda el método de regresión discontinua; supuestos del salto en la probabilidad de ser tratado y el supuesto de continuidad en torno al punto de corte. Sin bien, claramente se cumple con el primer supuesto, dado que hay un cambio de la aplicación de la tarifa alrededor de la línea de 45 grados de las distancias a los medoides según el tipo de municipio, no es posible el cumplimiento del segundo supuesto por el método de construcción del clúster.

Esto se debe a que, en general, los métodos de clusterización tienen como función objetivo minimizar las distancias entre las observaciones con el propósito de concentrarlas alrededor de un punto central y crear grupos lo más homogéneo posible, dando como resultado una estructura que no garantiza continuidad en las características en ambos lados del umbral. Sin embargo, esto no implica la violación del supuesto de no manipulación, ya que no se cuenta con el control sobre el desempeño de los municipios para determinar su clasificación dentro de cada uno de los grupos que resultan del método de clusterización.

Sin embargo, la combinación de la metodología de regresión discontinua con la metodología de diferencias en diferencias permite mitigar este desafío y garantizar la validez de la identificación. Esta combinación permite encontrar un umbral óptimo bajo el cual el grupo de contraste, compuesto por municipios que se encuentran alrededor del punto de corte, asegure las tendencias paralelas entre grupos tratados y no tratados. De esta manera se consolida una la estrategia de identificación que permite corregir posibles sesgos y asegurar que las estimaciones reflejen de manera precisa el efecto del tratamiento a nivel local.

²⁸ En el proceso de clusterización, las distancias Manhattan se calculan como la suma de las diferencias absolutas entre las variables de caracterización de los municipios, una vez estas han sido normalizadas. Esto implica que cada variable se ajusta a una escala común, permitiendo que las diferencias en unidades de medida no influyan desproporcionadamente en el cálculo de la distancia total. En este sentido, una misma distancia Manhattan puede ser el resultado de la suma de diferentes composiciones de distancias en las variables consideradas con respecto a sus respectivos medoides.

3.4. Efectos sobre las estrategias de competencia de los PRSTM.

Para evaluar los efectos de la Resolución CRC 6298 de 2021 sobre las estrategias de competencia de los Proveedores de Servicios de Telecomunicaciones Móviles (PRSTM), se utiliza un modelo de diferencias en diferencias (DiD). El modelo se especifica de la siguiente manera:

$$Y_{it} = \beta T_{it} + \lambda X_{it} + \alpha_i + c_t + \mu_{it}$$

Donde:

- Y_{it} : es la variable dependiente para el grupo i en el tiempo t . Las variables dependientes incluyen:
Densidad de los Sitios 4G per cápita: Es el resultado de dividir la densidad de los sitios 4G sobre el total de la población del municipio.
Densidad de los Sectores 4G per cápita: Es el resultado de dividir la densidad de los sectores 4G sobre el total de la población del municipio.
Tráfico de Datos per Cápita: Resulta de dividir el tráfico medido en terabytes sobre el total de la población del municipio.
- T_{it} : Es la interacción de la variable que identifica los municipios de tarifa regulada y tarifa negociada por la variable que establece si el año es antes o después de la entrada en vigor de la Resolución CRC 6298 de 2021.
- α_i : Son los efectos fijos por municipio.
- c_t : Son los efectos fijos del tiempo.
- β : Es el coeficiente de interés que mide el efecto local de la de la regulación.
- X_{it} : Conjunto de controles que incluye variables como la cantidad de obligaciones de hacer, estrato socioeconómico, consumo de energía, incidencia de terrorismo y proporción de servicios satelitales.
- μ_{it} : El término del error.

La base de datos contiene información a nivel municipal para 1121 municipios en Colombia, cubriendo el periodo de 2018 a 2023. Esta información incluye tanto elementos de infraestructura como datos de tráfico reportados por los operadores móviles en Colombia. Las variables están balanceadas a nivel anual, lo que permite realizar un análisis robusto en torno a los años pre y post implementación de la resolución regulatoria. Para garantizar la validez del modelo DiD, es crucial cumplir con el supuesto de tendencias paralelas entre los municipios tratados (tarifa regulada) y el grupo de control (tarifa negociada). En este contexto, se grafican las tendencias de las variables dependientes para ambos grupos. Como se muestra en los Paneles B, D y F de la Ilustración 13, las tendencias a nivel visual muestran una relación paralela antes de la implementación de la resolución. A continuación, se presentan los resultados que buscan confirmar la validez del contrafactual a partir de dichas tendencias.

Tabla 2. Efectos sobre la densidad de los Sitios 4G y Sectores 4G per cápita y Tráfico per cápita de datos móviles (TB).

	(1) Densidad de los Sitios 4G per cápita	(2) Densidad de los Sectores 4G per cápita	(3) Tráfico de Datos per Cápita
LATTE			
Tarifa Regulada	-0,735** (-2,74)	-4,437** (-2,72)	395,9*** (3,94)
Controles	Si	Si	Si
N	426	426	426
Promedio	1,57	7,7	534,5621

t-statistics in parentheses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

La Tabla 2 muestra los resultados del modelo de diferencias en diferencias con lógica de regresión discontinua, es decir se realiza la estimación de los resultados para aquellos municipios que se encuentren a una distancia Manhattan de la línea de 45 grados descrita anteriormente. Estos resultados proporcionan evidencia empírica del impacto local de la regulación de tarifas sobre la infraestructura y el uso de datos en el contexto de telecomunicaciones móviles en Colombia, específicamente bajo la Resolución CRC 6298 de 2021. Los resultados revelan un aumento relativo del 46.8% en la densidad de sitios 4G por cápita de los municipios de tarifa negociada con respecto al promedio general. Este hallazgo es consistente con la teoría de incentivos económicos, que indica que una menor rentabilidad (debido a tarifas reguladas) desincentiva la expansión de infraestructura.

Este incremento significativo en la densidad de sitios 4G per cápita en los municipios de tarifa negociada sugiere que la mayor presión económica en municipios con tarifa negociada incentivó a los operadores a expandir su infraestructura de forma más agresiva en comparación con los municipios regulados, en donde los incentivos para la expansión se reducen debido al menor costo de acceso al RAN.

De forma similar, se evidencia un aumento de aproximadamente el 57.6% en la densidad de sectores 4G per cápita respecto a un promedio general. Este hallazgo presenta evidencia de un efecto significativo de la política sobre la capacidad de densificación de redes, dado que está directamente relacionado con la cantidad de Sitios 4G. En este sentido, la densidad de sectores 4G por km² ajustada por población también refleja un comportamiento expansivo en los municipios de tarifa negociada. Sin embargo, se observan variaciones en la magnitud de los incrementos en comparación con la densidad de sitios 4G, lo que indica que la correlación entre los sectores y sitios no es completamente lineal, posiblemente debido a decisiones estratégicas específicas de cada operador.

En términos de tráfico per cápita, se encuentra un incremento del 74% en los municipios con tarifa regulada, lo cual es consistente con la hipótesis de que la regulación de tarifas para el uso del RAN fomenta la competencia en servicios. Los operadores, al beneficiarse de las tarifas reguladas, pueden ofrecer servicios más competitivos y expandir su cobertura en zonas donde anteriormente no tenían presencia. Esto mejora la experiencia del usuario y facilita la expansión de la conectividad en el país. El incremento de 395.9 Terabytes en el tráfico de datos por cápita en los municipios regulados puede como un aumento de los niveles de competencia en las áreas reguladas, derivada de tarifas más accesibles, lo cual incentiva el consumo.

Con el propósito de establecer el cumplimiento del supuesto de tendencia paralelas, se especifica un modelo dinámico, que adicionalmente permite comprobar el efecto dinámico de la regulación. Bajo este marco, se corre la siguiente regresión:

$$Y_{it} = \beta_0 + \sum_{k=-m}^{-1} \delta_k Post_{it}^k + \sum_{k=0}^n \theta_k Post_{it}^k \cdot regulado_i + \lambda X_{it} + \alpha_i + c_t + \mu_{it}$$

Partiendo de la especificación anterior, el modelo de efectos dinámicos incorpora los siguientes parámetros y variables:

$Post_{it}^k$: Es una variable dummy de tiempo que captura el periodo precede a la emisión de la Resolución CRC 6298 de 2021 (*leads*) y el periodo posterior (*lags*). Para los leads ($k < 0$), se evalúa si hay diferencias en tendencias antes de la implementación de la política, y para los lags ($k \geq 0$), se mide el impacto en periodos posteriores a la implementación.

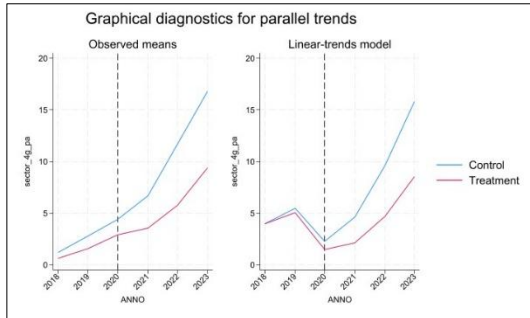
$regulado_i$: es una variable dummy que toma el valor de 1 si el municipio se encuentra en el ámbito de aplicación de la tarifa regulada y cero de lo contrario.

θ_k : es el parámetro que mide el efecto diferencial de la regulación objeto de evaluación para cada año a partir de la expedición de esta (efectos dinámicos).

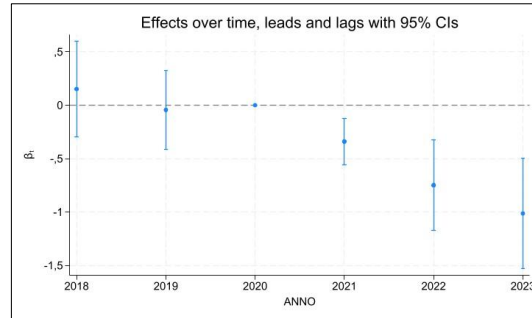
δ_k : mide el efecto anticipado (*lead*) de la medida regulatoria en los años anteriores a su expedición²⁹.

Ilustración 13. Análisis gráfico de los resultados del modelo de Diferencias en Diferencias con lógica de regresión discontinua.

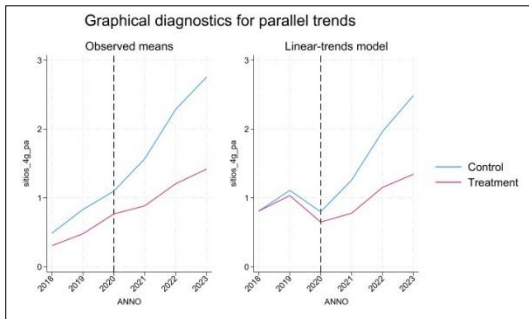
Panel A. Diagnóstico Gráfico de tendencias: Sitios 4G sobre densidad



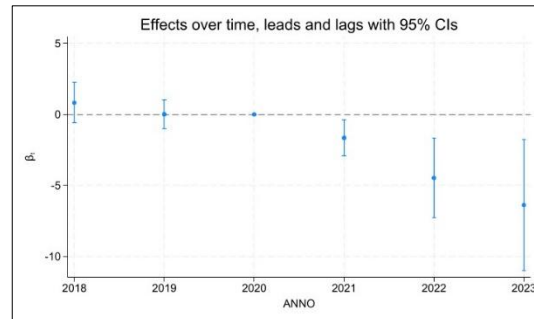
Panel B. Gráfico de Causalidad de Granger: Sitios 4G sobre densidad



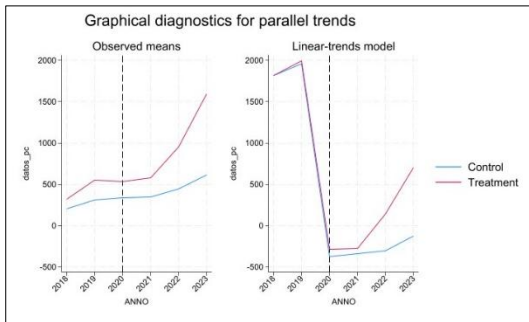
Panel C. Diagnóstico Gráfico de tendencias: Sectores 4G sobre densidad



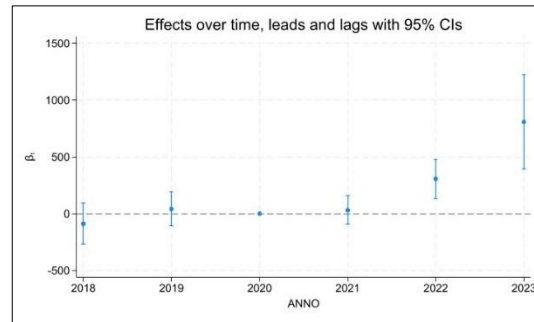
Panel D. Gráfico de Causalidad de Granger: Sectores 4G sobre densidad



Panel E. Diagnóstico Gráfico de tendencias: Tráfico per Cápita de datos móviles



Panel F. Gráfico de Causalidad de Granger: Tráfico per Cápita de datos móviles



En la

Ilustración 13 se presentan los resultados gráficos del análisis de diferencias en diferencias (DiD) combinado con lógica de regresión discontinua para evaluar los efectos dinámicos de la adopción de tarifas reguladas frente a tarifas negociadas en los municipios de acotados. Los gráficos que se encuentran en los paneles de la izquierda permiten realizar el diagnóstico sobre el cumplimiento del

²⁹ Si $\delta_k = 0$ para todos los periodos antes del tratamiento ($k < 0$), esto sugiere que no hay evidencia de que los grupos difieran significativamente en la variable dependiente antes de la implementación de la política o intervención.

supuesto de identificación basado en las tendencias paralelas se cumple antes de la implementación de la medida regulatoria, mientras que los gráficos de los paneles de la derecha presentan la evidencia estadística de dicha prueba y además muestran los efectos dinámicos³⁰ con intervalos de confianza al 95%, estimados sobre el rango de tiempo posterior a la implementación de la Resolución CRC 6298 de 2021 tomando como año base el año inmediatamente anterior a su expedición.

De acuerdo con los resultados, el modelo de tendencias lineales comparado entre el grupo de municipios de tarifa regulada y el grupo de municipios de tarifa negociada revela trayectorias similares antes de la implementación de la medida regulatoria, este análisis gráfico apoya la validez de la existencia de las tendencias regulatorias. Adicionalmente, las medias observadas en las gráficas de los paneles de la izquierda permiten ver el desempeño de la densidad de los sitios 4G per cápita; la densidad de los sectores 4G per cápita y el tráfico de datos per cápita posterior a la emisión de la Resolución CRC 6298 de 2021.

En este sentido, se observa que, si bien estas variables presentan un crecimiento en sus valores, se evidencia un aumento más que proporcional en la pendiente las variables asociadas a los elementos de la red de acceso para el caso de los municipios de tarifa negociada en contraste a los grupos de municipios de tarifa regulada. Mientras que para el caso del tráfico per cápita este comportamiento se observa en el sentido contrario, es decir los municipios de tarifa regulada presentan el mayor incremento en esta variable.

Estas conclusiones son verificadas con las gráficas del panel B, en donde se presenta evidencia estadística sobre la existencia de tendencias paralelas antes de la intervención regulatoria, lo que significa que el grupo de control es un contrafactual válido. De igual manera, se observa que el cambio en el crecimiento en la tendencia de la densidad del despliegue de elementos de red de acceso y el tráfico per cápita se acentúa con el tiempo, lo anterior, debido a la presencia de efectos dinámicos sobre las variables resultado. Este resultado se puede deber a la presencia de los siguientes canales:

Rentabilidad en el despliegue de infraestructura: Los operadores puede asignar recursos de manera más rentable en los municipios de tarifa negociada lo que les permite amortizar la inversión de los elementos de la red de acceso, mientras que, en los municipios de tarifa regulada, el aumento de la eficiencia de uso de los elementos de acceso permite contribuir a apalancar dichos elementos de infraestructura. De acuerdo con identificado por el clúster, los municipios susceptibles de la aplicación de la tarifa negociada cuentan con un mayor nivel de desarrollo, lo que les facilita la promoción de la expansión de la infraestructura 4G. Esto se traduce en un incremento más acelerado en términos relativos en la densidad de sitios y sectores de estos municipios.

Ajuste en la demanda de datos móviles en RAN: Los municipios con tarifas reguladas podrían contar con una mejor oferta comercial de servicios de datos móviles, lo que se podría traducir en un aumento del tráfico de datos per cápita superior. Este aumento de la oferta comercial va de la mano con el aumento de la competencia basada en servicios en los municipios de tarifa regulada. Así las cosas, la oferta de acceso al servicio de datos móviles se puede asociar a las características socioeconómicas de los municipios, lo que permiten una mayor penetración según las capacidades disponibles.

Incentivos de expansión controlada: Los operadores de servicios móviles podrían privilegiar un crecimiento controlado que prioriza la calidad de servicio en municipios de mayor competencia, a la vez que maximizan el tráfico cursado sin necesariamente aumentar de manera proporcional la infraestructura en los municipios de tarifa regulada.

En cualquiera de los casos, estos posibles canales de transmisión de los efectos de la Resolución CRC 6298 de 2021 están acordes a los impactos esperados desde el punto de vista del diseño regulatorio.

³⁰ En el literal G de la sección Anexos se presentan las tablas de los efectos dinámicos de la Resolución CRC 6298 de 2021 sobre la densidad de los sitios 4g per cápita; la densidad de los sectores 4g per cápita y el tráfico de datos per cápita.

Sin embargo, con la información disponible no es posible discernir cual de estos canales podrían estar efectivamente generando los resultados encontrados.

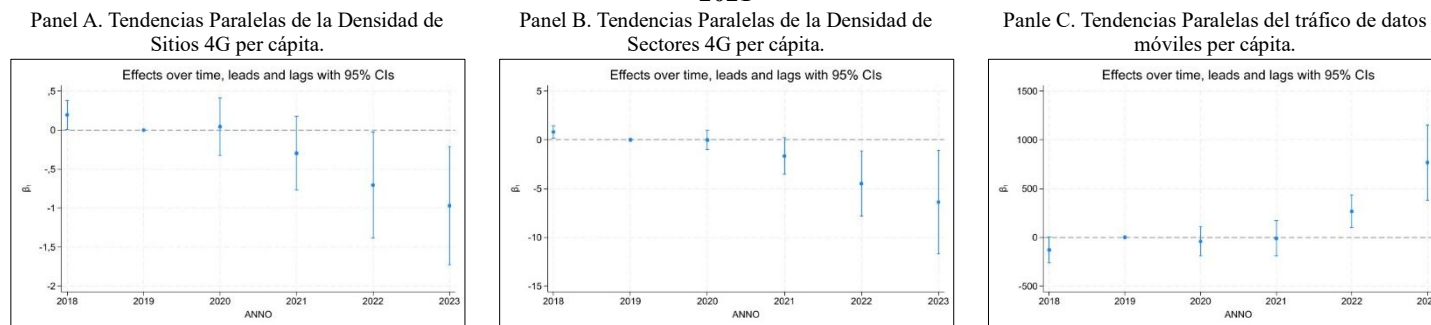
3.5. Pruebas de robustez y validación del modelo de DiD con lógica de regresión Discontinua³¹.

Con el propósito de establecer la sensibilidad de los resultados frente a modificaciones en la especificación de la forma funcional adoptada para evaluar el impacto de la Resolución CRC 6298 de 2021, en esta sección se realizan dos tipos de pruebas de robustez y validación del modelo de DiD con lógica de regresión discontinua. De acuerdo con Lu & White (2014), las pruebas de robustez buscan evaluar cómo se comportan la estimación de los principales coeficientes de la regresión cuando la especificación de regresión se modifica agregando o eliminando regresores. Por su parte, Catherine et al. (2024), indican que las pruebas de robustez permiten verificar la existencia de mecanismos de transmisión de los efectos distintos a los inicialmente evaluados. Bajo este contexto, a continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de modificaciones a la especificación del modelo.

- **Resultados de la prueba placebo:**

En el marco de la metodología de DiD se hace necesario descartar la significancia de efectos en periodos de pre-tratamiento (Rosenbaum, 2010; Slusky, 2014), en este caso, antes de la expedición de la Resolución CRC 6298 de 2021. Esta prueba es importante dado que, de confirmarse efectos significativos antes del tratamiento, sería un indicio de la existencia de factores externos que están afectando las diferencias entre los grupos, razón por la cual no se podría atribuir el efecto a la intervención evaluada, comprometiendo la validez de los resultados.

Ilustración 14. Prueba placebo anticipando un año la entrada en vigor de la Resolución CRC 6298 de 2021



Por su parte, la validación del supuesto de tendencias paralelas se basa en la observación gráfica y pruebas estadísticas de las medias de las variables dependientes del grupo de tratamiento y control (Gibson & Zimmerman, 2021). Una prueba de robustez para la validación de este supuesto se sustenta en el retraso del inicio de la intervención, lo cual genera un placebo que permite validar si existen efectos significativos en el periodo pre-tratamiento (Egami & Yamauchi, 2023). En la Ilustración 14, se muestran los resultados de aplicación del placebo en la especificación del modelo propuesto para validar tanto los efectos dinámicos como para descargar la significancia de las diferencias de las medias de las variables de interés para los grupos de municipios de tarifa regulada y tarifa negociada antes de la expedición de la Resolución CRC 6298 de 2021.

³¹ No se consideró pertinente realizar pruebas de robustez adicionales sobre el ancho de banda seleccionado, definido una distancia Manhattan equivalente a 1 con respecto a la línea de 45 grados, dado que este valor representa el límite superior que asegura el cumplimiento del supuesto de tendencias paralelas entre los grupos de municipios de tarifa regulada y tarifa negociada. Reducir el ancho de banda más allá de este punto implicaría una disminución significativa en el número de municipios, lo cual a su vez se traduce en una pérdida de poder estadístico. Este ajuste óptimo maximiza la validez de los resultados obtenidos, al tiempo que minimiza los riesgos asociados con la reducción de observaciones, lo que refuerza la robustez de los hallazgos sin comprometer la precisión estadística.

A partir de los resultados arrojados por esta prueba se puede confirmar que, para el caso de la densidad de sitios 4G y sectores 4G per cápita, no encuentra ningún efecto significativo en este período anterior a la emisión de la Resolución CRC 6298 de 2021, lo cual se fortalece la credibilidad del supuesto de identificación de la metodología DiD con lógica de RD aplicado en el contexto de esta evaluación, es decir el supuesto de tendencias paralelas para el grupo de municipios que se encuentra a una distancia Manhattan de la línea de 45 grados. Este resultado es una evidencia de que los cambios observados son consecuencia de la intervención regulatoria y no el resultado de otros patrones subyacentes o sesgos presentes antes dicha intervención.

Sin embargo, para el caso del tráfico de datos móviles no se puede descartar la ausencia de factores externos que estén influenciando en la tendencia del consumo de este servicio. Entre estos factores, destaca la posible autocorrelación en la demanda de datos, la cual podría estar relacionada con la expansión del uso de dispositivos móviles, cambios en las aplicaciones y hábitos de consumo digital, o con una mayor digitalización general de los usuarios. Esta autocorrelación implica que el consumo actual de datos puede estar fuertemente influido por patrones de uso en periodos anteriores, lo que podría generar una tendencia de crecimiento en el tráfico de datos de manera independiente de la intervención regulatoria. El fenómeno de la autocorrelación en las tendencias paralelas fue documentado en estudios como los de Angrist y Pischke (2009) y Bertrand, Duflo y Mullainathan (2004), en donde se sugiere que un análisis adicional para diferenciar entre patrones endógenos al tratamiento y tendencias previas del mercado es esencial para atribuir correctamente los efectos causales.

- **Resultados de la especificación alternativa con diferentes variables:**

Una especificación alternativa con variables adicionales en el contexto de la metodología de diferencias en diferencias (DiD) implica la inclusión de variables de control adicionales o el ajuste del modelo original para examinar la sensibilidad de los resultados principales. Esta prueba tiene como propósito establecer si los resultados obtenidos se mantienen consistentes al incluir factores que podrían estar correlacionados con las variables dependientes o con el tratamiento. Las especificaciones alternativas ayudan a captar variaciones no observadas que podrían sesgar los estimadores si quedan excluidas del análisis inicial, y permiten verificar si los efectos causales atribuidos al tratamiento se deben a las variables de interés y no a otras características subyacentes (Angrist & Pischke, 2009; Bertrand et al., 2004).

Esta prueba es importante porque permite reducir el riesgo de sesgo de especificación al controlar características que no fueron contempladas inicialmente y que podrían influir en la variable de resultado de manera no aleatoria entre los grupos de tratamiento y control (Athey & Imbens, 2017). De la especificación inicialmente implementada se encontró que la variable explicativa de mayor relevancia resultó ser el consumo promedio de energía por hogares en cada municipio medido en kilovatios. Esta variable sirve como un indicador de la actividad económica (Levinson, 2012), la apropiación tecnológica (Filippini and Pachauri, 2004), el nivel de urbanización (Rao et al., 2015) y el desarrollo de infraestructura (Banco Mundial 2021), cada uno de los cuales son factores que pueden influir significativamente en el despliegue de infraestructura de servicios móviles y con un mayor consumo de datos móviles (Wolfram, Shelef, and Gertler, 2012). Esta variable es relevante dado que al incluirla contribuye a estabilizar las tendencias de las variables de interés, indicando un vínculo entre la demanda de energía y la densidad de sitios y sectores 4G per cápita y el tráfico per cápita³². De acuerdo con este análisis, la prueba de consistencia consistió en excluir o agregar variables manteniendo el consumo promedio de energía como única variable explicativa en todas las

³² Algunos estudios han encontrado evidencia de la relación bidireccional entre el consumo de energía, el tráfico de datos móviles y el despliegue de infraestructura de comunicaciones móviles. Rao et al., (2015) señala que a medida que aumenta el consumo de datos, también aumenta la necesidad de energía para alimentar la infraestructura de telecomunicaciones, especialmente en zonas de alta densidad donde el tráfico de datos es intenso. En este mismo sentido, Czernich et al., (2011) y Aslan et al., (2018) indican la existencia de un ciclo de retroalimentación de la demanda de energía, a una mayor infraestructura intensifica el consumo de energía, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas.

especificaciones. En la primera especificación se corre el modelo con el promedio del consumo de energía por hogar medido en kilovatios como una variable explicativa; en la segunda especificación, se mantienen las variables descritas en la Tabla 2, con excepción de la cantidad de obligaciones de hacer, es decir se agregan el estrato socioeconómico, consumo de energía, incidencia de terrorismo y proporción de servicios satelitales. Por último, en la especificación 3, además de las anteriores, se incluye el valor agregado per cápita por municipio y el porcentaje de población rural.

Tabla 3. Prueba de robustez según especificación alternativa con diferentes variables

	Densidad de Sitios 4G per cápita			Densidad de sectores 4G per cápita			Tráfico datos móviles per cápita en RAN (Terabytes)		
	(1)	(2)	(4)	(5)	(7)	(8)	(10)	(11)	(12)
ATET	-0,730*	-0,735**	-0,733*	-4,308*	-4,437**	-4,530**	394,7***	395,9***	364,2***
	(-2,63)	(-2,75)	(-2,57)	(-2,56)	(-2,72)	(-2,68)	(3,91)	(3,94)	(3,75)
Controles	NO	SI	SI	NO	SI	SI	NO	SI	SI
N	426	426	426	426	426	426	426	426	426

t statistics in parentheses

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

Los resultados obtenidos demuestran que el impacto sigue siendo significativo, con variaciones que se mueven en un rango del -0,7% y -0,3% para la densidad de sitios 4G per cápita, el rango de movimiento para la densidad de sectores 4G per cápita está entre -2,9% y 2,1%, mientras que para el tráfico de datos per cápita este rango está entre el -8% y -0,3%. En la Tabla 3 se presentan los datos con distintas especificaciones.

Por otro lado, de acuerdo con los resultados obtenidos en las distintas especificaciones empleadas, no se encontró significancia estadística en la variable que contabiliza la cantidad de sitios y sectores de la tecnología 4G desplegados a raíz de las obligaciones adquiridas por parte de los adjudicatarios de la subasta de frecuencias del espectro del 2019. Estas obligaciones son relevantes dada su utilidad como herramienta de política pública para fomentar el cierre de brechas de infraestructura y mejorar la conectividad en municipios de difícil acceso o menos rentables para la inversión privada.

Tabla 4. Prueba de diferencias media de las obligaciones de despliegue de infraestructura por municipio.

Variable	Mpios	Mpios con Obl.	Media	Error. St.	[95% conf. interval]		t-statistic	p-value
Tarifa Regulada	456	234	6,07	0,74	4,61	7,53	-0,3227	0,7471
Tarifa Negociada	661	381	5,82	0,41	5,02	6,62		
Combinados	117	615	5,92	0,37	5,12	6,65		

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con la Tabla 4 no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los grupos de municipios analizados. En otras palabras, las obligaciones de despliegue se encuentran distribuidas equitativamente entre los grupos municipios, sin que se observe una prevalencia clara en uno sobre el otro. Es importante tener en cuenta que la ausencia de significancia estadística bajo el contexto de esta evaluación no indica el éxito o fracaso de esta medida de política pública. Por el contrario, los resultados de esta política deben ser evaluados en función de los criterios específicos establecidos para la asignación de la infraestructura en cada municipio, los cuales no necesariamente coinciden con los establecidos para la segmentación de la tarifa regulada.

4. Conclusiones.

El *Roaming* Automático Nacional (RAN) es un servicio que permite a un proveedor de redes y servicios de telecomunicaciones móviles (PRSTM) mantener la continuidad del servicio a los usuarios en zonas en donde no cuentan con infraestructura propia, por medio del acceso a la red de otro operador móvil. Este servicio se enmarca en las relaciones de acceso entre los PRSTM, dado que, pone a disposición el uso de recursos físicos y lógicos de la red para la provisión de servicios

(Resolución CRC 5050 de 2016), en donde el flujo de la comunicación va en un único sentido: desde el usuario del proveedor de red de origen (PRO) hacia la infraestructura del proveedor de red visitado (PRV), quien posteriormente la enruta hacia la red del PRO, facilitando así la expansión de servicios sin una inversión de infraestructura significativa (Cave & Marsden, 2018; Laffont & Tirole, 2000). Esta disposición es fundamental para los operadores entrantes o aquellos con menor cobertura, ya que reduce las barreras de entrada al permitir una mayor expansión del servicio sin necesidad de invertir en infraestructura redundante, con el propósito de fomentar la competencia en el mercado de servicios móviles (ITU, 2016).

La Resolución CRC 6298 de 2021 estableció las condiciones de remuneración y adoptó un listado de 460 municipios como ámbito geográfico de aplicación de la tarifa regulada del RAN en Colombia, mientras que la tarifa de remuneración quedó sujeta a negociación entre los operadores para el resto de los 661 municipios del país. La identificación de estos ámbitos geográficos se realizó en función de su nivel de competencia y desarrollo de la infraestructura, a partir de un proceso de clusterización híbrido. Esta segmentación presentó una oportunidad para evaluar los efectos de la regulación del RAN sobre las estrategias de competencia en el mercado de servicios móviles, particularmente la estrategia basada en infraestructura y la basada en servicios, de acuerdo con los incentivos generados por la regulación.

La metodología empleada en este estudio combinó el enfoque de Diferencias en Diferencias (DiD) con lógica de Regresión Discontinua (RD), para abordar la posible endogeneidad en la selección de municipios y garantizar un análisis robusto de los efectos causales. La clusterización con el método *k-medoids* fue instrumental en segmentar los municipios según sus características estructurales relevantes, y el cálculo de distancias Manhattan a los centros de los clústeres permitió establecer un rango creíble de comparación en torno al punto de corte, en línea con lo propuesto por la metodología Diferencias en Discontinuidad (Picchetti et al., 2024).

Aunque este enfoque cumple con el primer supuesto de identificación requerido por la metodología de regresión discontinua, no logra asegurar la continuidad de las variables explicativas en torno al punto de corte debido a la estructura intrínseca de los clústeres. Sin embargo, este incumplimiento no se debe a manipulación, sino a las características del proceso de segmentación. La combinación de RD con la metodología de DiD permite mitigar este inconveniente, dado que, al seleccionar los municipios cercanos al umbral de discontinuidad, se asegura de manera objetiva que se cumple de forma fáctica con la condición de tendencias paralelas entre grupos municipios de tarifa regulada y tarifa negociada, por tanto, se logra establecer un grupo contrafactual robusto. Esto fortalece la validez del diseño y asegura que las estimaciones del efecto causal local sean precisas y representen adecuadamente el impacto de la política regulatoria.

Para asegurar este procedimiento de contraste, adicionalmente, se requirió incorporar elementos relevantes para la toma de decisiones sobre el despliegue de infraestructura por parte de los PRSTM y para la caracterización del consumo de los servicios móviles. En este sentido, la división de los sitios 4G, sectores 4G y tráfico de datos sobre la dimensión del área geográfica de los municipios y la población fue clave para cumplir con el supuesto de tendencias paralelas. Este ejercicio logró incorporar los factores relacionados con la heterogeneidad espacial y demográfica; y los factores de escala en el crecimiento de la infraestructura, así como crear una métrica comparable entre municipios con distintas características, lo que a su vez asegura que los cambios observados en las variables estudiadas reflejen el impacto de la regulación en lugar de las diferencias estructurales entre municipios.

De conformidad con los resultados, se puede afirmar que la Resolución CRC 6298 de 2021 generó incentivos para la reasignación de la inversión hacia los mercados con mayor desarrollo en competencia. En términos relativos a la superficie per cápita, se encuentra evidencia de un aumento del 46.8% en la densidad de sitios 4G y del 57.6% en los sectores de esta tecnología en municipios

con tarifa negociada, donde el costo de oportunidad del uso del RAN es mayor, reflejando un comportamiento competitivo entre PRSTM (Briglauer, 2014). En contraste, en municipios con tarifa regulada, el tráfico per cápita de datos móviles en RAN aumentó un 7.8% dos años después de la implementación de la resolución, lo cual indica un fortalecimiento de la competencia en la provisión de servicios en estas zonas (Cave, 2006).

Estos resultados sugieren que los operadores entrantes tuvieron incentivos para aumentar los niveles de competencia en las zonas de tarifa regulada (Cave & Marsden, 2018), lo que a su vez puede incentivar el aumento de la competencia en términos generales, dado que también les permite priorizar sus recursos de inversión hacia los municipios identificados con el mayor desarrollo competitivo, es decir, un aumento de la competencia basada en infraestructura (Genakos et al., 2018). Los resultados observados reflejan que los operadores de servicios móviles son elásticos a la medida regulatoria dada su respuesta significativa.

Es importante resaltar que esta investigación aporta evidencia empírica de los efectos de la intervención regulatoria en un escenario en donde cerca del 90% del tráfico de RAN es originado por proveedores que han sido caracterizados como entrantes en el mercado en diferentes momentos del tiempo. Esto conlleva a que la estructura competitiva del mercado esté fuertemente influenciada por estos actores emergentes, quienes pueden sustentarse en la regulación para optimizar sus costos de operación y ampliar su cobertura sin necesidad de invertir de forma inmediata en infraestructura propia. Esta dinámica incentiva la competencia en términos de tarifas y calidad de servicio, beneficiando a los consumidores (Nitsche & Wiethaus, 2009).

De forma similar, en este mismo mercado se cuenta con un operador con posición significativa de mercado, que concentra un 47,6% de los accesos de internet móvil y 59,4% del ingreso total de este servicio (CRC, 2023), el cual fue declarado operador dominante de acuerdo con la Resolución CRC 6146 de 2021. La presencia de un operador dominante plantea desafíos regulatorios adicionales, ya que puede limitar la efectividad de la competencia (Genakos et al., 2018). Esto exige la adopción de medidas adecuadas para garantizar que los operadores más pequeños y entrantes tengan igualdad de condiciones para competir.

Si bien la regulación del RAN es de carácter general y no está orientada exclusivamente a mitigar problemas específicos de competencia identificados en el mercado, su aplicación ayuda a reducir ciertas barreras de entrada al facilitar el acceso a la infraestructura de red (Mölleryd & Markendahl, 2013). No obstante, durante su implementación se requiere de una supervisión continua, puesto que las diferencias en capacidad de inversión entre los operadores dominantes y los entrantes generen una brecha en la calidad del servicio y en la expansión de la infraestructura en el largo plazo (Grajek & Röller, 2012; Briglauer, 2014). En este sentido, el desafío regulatorio es aún mayor, debido a que este tipo de medidas deben complementarse con políticas que fomenten la inversión en redes por parte de los operadores entrantes, garantizando así una competencia sostenible y equilibrada en el tiempo.

De forma similar, la reasignación de recursos de inversión entre distintos grupos de municipios genera diferencias en la velocidad del despliegue de infraestructura, lo que puede conllevar a una limitación en la capacidad de los municipios regulados para competir eficazmente en este mercado en el largo plazo. Así las cosas, existe un riesgo latente del crecimiento de la brecha entre grupos de municipios en términos de calidad y disponibilidad de infraestructura, afectando la competitividad de los municipios regulados. Estos rezagos podrían tener implicaciones sobre la equidad en el acceso a servicios móviles. En este contexto, la implementación de medidas que reduzcan las barreras de entrada en combinación con aquellas que promuevan la inversión en infraestructura son clave para evitar efectos negativos de largo plazo y asegurar un entorno competitivo robusto. Esto puede incluir políticas de reasignación de recursos y estrategias específicas para garantizar que tanto operadores establecidos como nuevos actores puedan responder adecuadamente a las condiciones del mercado.

Si bien, los resultados encontrados demuestran una respuesta positiva de los operadores de servicios móviles frente a la regulación del *Roaming* Automático Nacional, la evidencia aportada por diversos autores sobre la compleja relación entre la regulación y la inversión en el sector de las telecomunicaciones (Friederiszick et al., 2008; Gentzoglanis, 2004; Ahmed, 2012). De acuerdo con Genakos, et al., (2018), la regulación, al limitar los retornos potenciales, puede reducir las inversiones en infraestructura de operadores establecidos, mientras que una regulación equilibrada podría fomentar la inversión y competencia, optimizando los resultados del mercado. Especialmente, en los países en vía de desarrollo aún permanece latente la discusión sobre el grado de intervención regulatoria óptimo, comprendido como aquel que permite fomentar la competencia a la vez que fomenta la inversión, es decir establecer un equilibrio entre la eficiencia estática y la eficiencia dinámica.

La implementación de la regulación del RAN en mercados con características de dominancia y alta concentración de tráfico en operadores entrantes es una medida necesaria. Sin embargo, las autoridades nacionales regulatorias deben realizar un monitoreo continuo de los mercados, de tal manera que puedan tomar decisiones oportunas para mitigar efectos no deseados, como por ejemplo mitigar la concentración excesiva de mercado, la reducción de incentivos para la inversión en infraestructura de telecomunicaciones en zonas menos desarrolladas, el rezago en la adopción tecnológica o la ampliación de la brecha digital entre regiones.

Por último, es importante destacar la contribución metodológica que surge de implementar la combinación de métodos de diferencias en discontinuidades (DiDC), aunque esta depende de la verificación del supuesto de discontinuidad alrededor del punto de corte, y técnicas de clusterización para evaluar efectos causales en telecomunicaciones. La ausencia de evidencia en la literatura sobre la aplicación de esta aproximación metodológica invita a la discusión sobre los efectos sobre el cumplimiento del supuesto de identificación en un contexto de segmentación por clusterización, así mismo en la necesidad de avanzar en métodos de validez y eficiencia de estimadores en estudios de inferencia causal.

5. Referencias

- Alcatel-Lucent. (2009). *Long Term Evolution (LTE): The vision beyond 3G*. Obtenido de https://www.3g4g.co.uk/Lte/LTE_WP_0903_AlcatelLucent.pdf
- Ahmed, R. (2012). Is there an optimal capital structure in the UK telecommunication Industry. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:167315150>
- Angrist, J. D., & Pischke, J. S. (2009). *Mostly harmless econometrics: An empiricist's companion*. Princeton university press.
- Armstrong, M. (2001). *The theory of access pricing and interconnection*.
- Athey, S., & Imbens, G. W. (2017). The state of applied econometrics: Causality and policy evaluation. *Journal of Economic perspectives*, 31(2), 3-32.
- Bain, J. S. (1956). *Barriers to New Competition: Their Character and Consequences in Manufacturing Industries* (1st Edition ed.). Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press. doi:<https://doi.org/10.4159/harvard.9780674188037>
- Banerjee, N., Corner, M. D., Towsley, D., & Levine, B. N. (2008, September). Relays, base stations, and meshes: enhancing mobile networks with infrastructure. In *Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking* (pp. 81-91).

- Bartalotti, O., & Brummet, Q. (2017). Regression discontinuity designs with clustered data. In *Regression discontinuity designs: Theory and applications* (pp. 383-420). Emerald Publishing Limited.
- BEREC. (13 de June de 2019). *BEREC Common Position on Mobile Infrastructure Sharing*. Recuperado el 14 de December de 2023, de https://www.berec.europa.eu/sites/default/files/files/document_register_store/2019/6/BoR_%2819%29_110_CP_Infrastructure_sharing.pdf
- Bertrand, M., Duflo, E., & Mullainathan, S. (2004). How much should we trust differences-in-differences estimates?. *The Quarterly journal of economics*, 119(1), 249-275.
- Bhangu, P. K. (2020). Persistence of profitability in top firms: does it vary across sectors? *Competitiveness Review*, 30(3), 269–287. doi:<https://doi.org/10.1108/CR-12-2018-0087>
- Briglauer, W. (2014). The impact of regulation and competition on the adoption of fiber-based broadband services: recent evidence from the European union member states. *Journal of Regulatory Economics*, 46, 51-79.
- Bourreau, M., Cambini, C., & Hoernig, S. (2012). Ex ante regulation and co-investment in the transition to next generation access. *Telecommunications Policy*, 36(5), 399-406.
- Butts, K. (2021). Difference-in-differences estimation with spatial spillovers. *arXiv preprint arXiv:2105.03737*.
- Calonico, S., Cattaneo, M. D., Farrell, M. H., & Titiunik, R. (2017). rdrobust: Software for regression-discontinuity designs. *The Stata Journal*, 17(2), 372-404.
- Carapeto, M., & Shah, A. (2005). Optimal capital structure in the telecoms industry: Myth or reality? *Journal of Restructuring Finance*, 2(2), 189–201. <https://doi.org/10.1142/S0219869X05000439>
- Catherine, S., Ebrahimian, M., Fereydounian, M., Sraer, D., & Thesmar, D. (2022). Robustness checks in structural analysis (No. w30443). National Bureau of Economic Research.
- Cave, M. (2006). Encouraging infrastructure competition via the ladder of investment. *Telecommunications Policy*, 30(3-4), 223-237.
- Cattaneo, M. D., & Escanciano, J. C. (2017). *Discontinuity Designs: Theory and Applications*.
- Choudhary, M. A., Babar, H., Shakeel, H., & Abbas, A. (2009). Economics of network sharing - A case study of mobile telecom sector in Pakistan. *2009 5th International Conference on Collaborative Computing: Networking, Applications and Worksharing*, (págs. 1-6). Washington, DC, USA. doi:10.4108/ICST.COLLABORATECOM2009.8390
- Coopersmith, J. (2010). Old technologies never die, they just don't get updated. *The International Journal for the History of Engineering & Technology*, 80(2), 166-182. doi:<https://doi.org/10.1179/175812110X12714133353678>
- CRC. (Noviembre de 2016). *Análisis de Ofertas Empaquetadas en Colombia*. Obtenido de <https://www.crcom.gov.co/es/biblioteca-virtual/analisis-ofertas-empaquetadas-en-colombia>
- CRC. (26 de Diciembre de 2016). Documento soporte del Proyecto regulatorio "Condiciones para la provisión de la instalación esencial de Roaming Automático Nacional". 112. Obtenido de Disponible en: https://www.crcom.gov.co/system/files/Proyectos%20Comentarios/8000-76-28/Propuestas/doc_soporte_ran_v_publicar26_12_16.pdf

- CRC. (29 de Diciembre de 2020). *Documento soporte del proyecto regulatorio "Revisión de la Resolución CRC 5107 de 2017"*. Obtenido de Comisión de Regulación de Comunicaciones: https://www.crcm.gov.co/system/files/Proyectos%20Comentarios/2000-38-4-2/Propuestas/3.%20Documento_Soporte%20RAN.pdf
- CRC. (2021). Resolución CRC 6298 de 2021. *Diario Oficial No. 51.674 de 14 de mayo de 2021*. Obtenido de Diario Oficial No. 51.674 de 14 de mayo de 2021: http://normograma.crcm.gov.co/crc/compilacion/docs/resolucion_crc_6298_2021.htm
- CRC. (30 de Diciembre de 2022). *Documento soporte del proyecto regulatorio "Análisis de los mercados de internet fijo y su relación con el mercado mayorista portador"*. Obtenido de Comisión de Regulación de Comunicaciones : <https://www.crcm.gov.co/es/proyectos-regulatorios/2000-38-3-6>
- CRC. (30 de Enero de 2024). *Postdata*. Obtenido de Valor de Remuneración de Roaming Automático Nacional: <https://postdata.gov.co/dataset/cargos-de-acceso-redes-fijas-y-m%C3%B3viles/resource/7bc636f5-44a9-4bf4-ae10-16f9a6a11b35#{}>
- De-Antonio, J., Feijóo, C., Gómez-Barroso, J., Rojo, D., & Marín, A. (2006). A European perspective on the deployment of next generation networks. *Journal of the Communications Network*, 5(2), 47–55.
- De Bijl, P., & Peitz, M. (2002). New competition in telecommunications markets: Regulatory pricing principles (No. 678). CESifo Working Paper.
- DeMaagd, K. (2009, January). The myth of population density and ICT infrastructure. In 2009 42nd Hawaii International Conference on System Sciences (pp. 1-10). IEEE.
- Drias, H., Cherif, N. F., & Kechid, A. (2015, November). K-MM: A hybrid clustering algorithm based on k-means and k-medoids. In *Advances in Nature and Biologically Inspired Computing: Proceedings of the 7th World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC2015) in Pietermaritzburg, South Africa, held December 01-03, 2015* (pp. 37-48). Cham: Springer International Publishing.
- Duvall, J. B., & Ford, G. S. (Abril de 2001). Changing Industry Structure: The Economics of Entry and Price Competition. 36. doi:<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.587052>
- Egami, N., & Yamauchi, S. (2023). Using Multiple Pretreatment Periods to Improve Difference-in-Differences and Staggered Adoption Designs. *Political Analysis*, 31(2), 195-212. doi:<https://doi.org/10.1017/pan.2022.8>
- Fakir, A. M., Karim, A., Mubde, M. B., Aziz, M., & Ahmad, A. (2020). Can visual nudges reduce smoking tobacco expenditure? Evidence from a clustered randomized controlled trial in rural Bangladesh. *Journal of Smoking Cessation*, 15(3), 163-170.
- Filippini, M., & Pachauri, S. (2004). Elasticities of electricity demand in urban Indian households. *Energy policy*, 32(3), 429-436.
- Fisher, F. M. (1979). Diagnosing Monopoly. *Quarterly Review of Economics and Business*, 19(2), 7-33.
- Friederiszick, H. (2008). Analyzing the relationship between regulation and investment in the telecom sector.

- Frisanco, T., Tafertshofer, P., Lurin, P., & Ang, R. (2008, April). Infrastructure sharing and shared operations for mobile network operators from a deployment and operations view. In NOMS 2008-2008 IEEE Network Operations and Management Symposium (pp. 129-136). IEEE.
- Geddam, D. P., Subramaniam, V., & Metharamitta, P. (2010). Distributed power plant architecture in a shared infrastructure network. *Intelec 2010*, pp. 1-5. doi:10.1109/INTLEC.2010.5525677
- Genakos, C., Valletti, T., & Verboven, F. (2018). Evaluating market consolidation in mobile communications. *Economic Policy*, 33(93), 45-100.
- Gentzoglanis, A. (2004, September). Regulatory risk, cost of capital and investment decisions in the telecommunications industry: international comparisons. In *Conferência Earie* (Vol. 31).
- Gibson, L., & Zimmerman, F. (2021). Measuring the sensitivity of difference-in-difference estimates to the parallel trends assumption. *Research Methods in Medicine & Health Sciences*, 2(4), 148-156. doi:<https://doi.org/10.1177/26320843211061306>
- Glimstedt, H. (2001). Competitive dynamics of technological standardization: The case of third generation cellular communications. *Industry and Innovation*, 8(1), 49-78.
- Grajek, M., & Röller, L. H. (2012). Regulation and investment in network industries: Evidence from European telecoms. *The Journal of Law and Economics*, 55(1), 189-216.
- Grigorik, I. (2021). *Mobile Networks*. Recuperado el 14 de Octubre de 2024, de High Performance Browser Networking: <https://hpbnp.co/mobile-networks/>
- GSMA. (18 de June de 2019). *Infrastructure Sharing: An Overview*. Recuperado el 13 de December de 2023, de Future Network: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wiki/infrastructure-sharing-an-overview/>
- Gupta, K. (2015). Technology standards and competition in the mobile wireless industry. *Geo. Mason L. Rev.*, 22, 865. Obtenido de <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:202119945>
- Hausman, C. R. (1997). *Charles S. Peirce's evolutionary philosophy*. Cambridge University Press.
- Hawthorne, R., Mondliwa, P., Paremoer, T., & Robb, G. (2016). Competition, Barriers to Entry and Inclusive Growth: Telecommunications Sector Study. 91. doi:<http://dx.doi.org/10.2139/SSRN.2866281>
- Hill, R. C., Fomby, T. B., Escanciano, J. C., Hillebrand, E., & Jeliaskov, I. (2017). Regression discontinuity designs: Theory and applications. Emerald Group Publishing.
- Islam, M. T., Basak, P. K., Bhowmik, P., & Khan, M. (2019, October). Data clustering using hybrid genetic algorithm with k-means and k-medoids algorithms. In 2019 23rd International computer science and engineering conference (ICSEC) (pp. 123-128). IEEE.
- ITU & World Bank. (25 de August de 2022). *Digital Regulation Platform*. Recuperado el 13 de December de 2023, de <https://digitalregulation.org/the-infrastructure-sharing-imperative/>
- ITU. (2016). *Core network dimensioning*. Obtenido de Unión Internacional de Telecomunicaciones.: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2016/Aug-WBB-Iran/Wirelessbroadband/core%20network%20dimensioning.pdf>
- ITU. (21 de February de 2016). *International Telecommunications Union*. Recuperado el 13 de December de 2023, de https://www.itu.int/en/ITU-D/Regulatory-Market/Documents/Infrastructure_portal/CRASA-ITU-IS_Guidelines_Final_Jan2018.pdf

- Jeanjean, F. (Octubre de 22). Co-Investment in the Sharing of Telecommunications Infrastructures. *Theoretical Economics Letters*, 12(5), 1297-1314. doi:10.2139/ssrn.3934437
- Jung, I., Gayle, P. G., & Lehman, D. E. (2008). Competition and investment in telecommunications. *Applied Economics*, 40(3), 303-313. doi:https://doi.org/10.1080/00036840600592882
- Kim, J., Kim, Y., Gaston, N., Kim, Y., & Lestage, R. (2010). Access regulation, competition, and the investment of network operators in the mobile telecommunications industry. Bond University Globalisation and Development Centre, (34)..
- Laffont, J. J., & Tirole, J. (2000). Global price caps and the regulation of access. *Brazilian Review of Econometrics*, 20(1), 115-146.
- Levinson, A. (2016). How much energy do building energy codes save? Evidence from California houses. *American Economic Review*, 106(10), 2867-2894.
- Lu, X., & White, H. (2014). Robustness checks and robustness tests in applied economics. *Journal of econometrics*, 178, 194-206.
- Macdonald, R. (2007). Estimation de la PTF en présence de points aberrants et de points leviers: examen de l'ensemble de données KLEMS. *Statistique Canada= Statistics Canada*.
- Maniadakis, D., & Varoutas, D. (2010, December). Population distribution effects in backbone network cost. In 2010 IEEE Globecom Workshops (pp. 410-414). IEEE.
- Manganelli, A., & Nicita, A. (2020). The Governance of Telecom Markets. En P. Macmillan (Ed.), *Competition Enhancement and Investment Promotion* (págs. 89-109). Palgrave Studies in Institutions, Economics and Law. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-58160-2_5
- Marckard, J. (2011). Transformation of Infrastructures: Sector Characteristics and Implications for Fundamental Change. *Journal of Infrastructure Systems*, 17(3), 107-117. doi:DOI: 10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000056
- Meddour, D.-E., Rasheed, T., & Gourhant, Y. (16 de Mayo de 2011). On the role of infrastructure sharing for mobile network operators in emerging markets. *Computer Networks*, 55, Issue 7., 1576-1591. doi:https://doi.org/10.1016/j.comnet.2011.01.023
- Misur, P. (2021). Competition and Telecommunications' Network Sharing. *Charles University in Prague Faculty of Law Research Paper Forthcoming*. doi:http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3869781
- Mölleryd, B. G., & Markendahl, J. (2013). The role of network sharing in transforming the operator business: Impact on profitability and competition. doi:https://api.semanticscholar.org/CorpusID:166888517
- Nirmal, S. (2019). Comparative study between k-means and k-medoids clustering algorithms. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 839(1), 839-844.
- Nitsche, R., & Wiethaus, L. (2011). Access regulation and investment in next generation networks—A ranking of regulatory regimes. *International Journal of Industrial Organization*, 29(2), 263-272.
- Norton, J. A., & Bass, F. M. (1987). A Diffusion Theory Model of Adoption and Substitution for Successive Generations of High-Technology Products. *Management Science*, 33(9), 1069-1086. doi:http://doi.org/10.1287/mnsc.33.9.1069

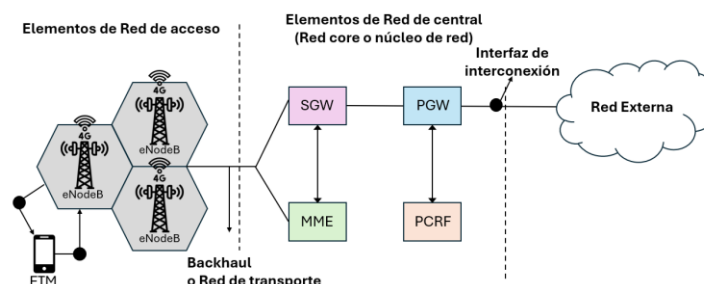
- Oesterreich, M. (2020). On the method of identification of atypical observations in time series. *Econometrics. Econometria. Advances in Applied Data Analytics*, 24(2), 1-16.
- Park, E.-A. (2009). Explicating barriers to entry in the telecommunications industry. *Info*, 11(1), 33-51. doi:<https://doi.org/10.1108/14636690910932984>
- Picchetti, P., Pinto, C. C., & Shinoki, S. T. (2024). Difference-in-Discontinuities: Estimation, Inference and Validity Tests. *arXiv preprint arXiv:2405.18531*.
- Repkine, A. (2009). Telecommunications Capital Intensity and Aggregate Production Efficiency: a Meta-Frontier Analysis. doi:<http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1334502>
- Rosenbaum, P. R., Rosenbaum, P., & Briskman. (2010). Design of observational studies (Vol. 10, pp. 978-1). New York: Springer.
- Sabella, D., De Domenico, A., Katranaras, E., Imran, M. A., di Dirolamo, M., & Salim, U. (2014). Energy Efficiency Benefits of RAN-as-a-Service Concept for a Cloud-Based 5G Mobile Network Infrastructure. *IEEE Access*, 2, 1586-1597. doi:doi:10.1109/ACCESS.2014.2381215
- Saha, B., Sengupta, K., Joshi, R., & Bhattacharya, S. N. (September de 2022). Evolution of Competition in Telecom Oligopoly – A Systematic Analysis in Post-Privatization Era. *International Journal of Business & Economics*, 21(2), 105-128.
- Sahoo, D. K., & Sahoo, P. K. (2022). Efficiency, productivity dynamics and determinants of productivity growth in Indian telecommunication industries: An empirical analysis. *Journal of Public Affairs*, 22(1). doi:<https://doi.org/10.1002/pa.2353>
- Santos, J. F., Kist, M., Rochol, J., & DaSilva, L. A. (Diciembre de 2020). Virtual Radios, Real Services: Enabling RANaaS Through Radio Virtualisation. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 17(4), 2610-2619. doi:10.1109/TNSM.2020.3009863
- Santos, J. F., Kist, M., van de Belt, J., Rochol, J., & DaSilva, L. A. (Mayo de 2019). Towards Enabling RAN as a Service - The Extensible Virtualisation Layer. In *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1-6. doi:10.1109/ICC.2019.8761679
- Schmalensee, R. (May de 2004). Sunk costs and antitrust barriers to entry. *American Economic Review*, 94(2), 471-475. doi:DOI: 10.1257/0002828041301975
- Segupta, J., & Fanchon, P. (2009). Chapter 4: Efficiency and Growth of the Telecom Industry. En J. Segupta, & P. Fanchon, *Efficiency, Market Dynamics and Industry Growth* (pág. 174). London. https://doi-org.ezproxy.uniandes.edu.co/10.1057/9780230248663_6: Palgrave Macmillan.
- Silva e Meirelles, D. (2010). Competitive Strategies and Potential of Entry Barriers un Services: A theoretical approach proposal. *Administração-Ensino Pesquisa*, 11(1), 79-110. doi:<https://doi.org/10.13058/raep.2010.v11n1.152>
- Singh, S. S., & Chauhan, N. C. (2011, May). K-means v/s K-medoids: A Comparative Study. In *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology* (Vol. 13).
- Sinton, D., & Teufel, A. S. (2011). Chapter 1. Telecom Basics - A Capital Intensive Sector. En D. Sinton, & T. Andrew S., *Fisher Investments' on Telecommunications*. (1st edition. ed., pág. 176). Hoboken: Wiley.

- Slusky, D. (2014). Measuring the ACA's parental mandate using difference-in-differences. Available at SSRN 2177436.
- Stewart, J., Shen, X., Wang, C., & Graham, I. (2011). From 3G to 4G: standards and the development of mobile broadband in China. *Technology Analysis & Strategic Management*, 23(7), 773-788.
- Syamkumar, M., Barford, P., & Durairajan, R. (2018, August). Deployment characteristics of "the edge" in mobile edge computing. In *Proceedings of the 2018 workshop on mobile edge communications* (pp. 43-49).
- Valaskova, K., Durica, M., Kovacova, M., Gregova, E., & Lazaroiu, G. (2019). Oligopolistic Competition among Providers in the Telecommunication Industry: The Case of Slovakia. *Administrative Sciences*, 9(3), 49. doi:<https://doi.org/10.3390/admsci9030049>
- Van Der Klaauw, W. (2010). Regression-discontinuity analysis. In *Microeconometrics* (pp. 214-220). London: Palgrave Macmillan UK.
- Vellido, A., Castro, F., Nebot, A., & Mugica, F. (2006, January). Characterization of atypical virtual campus usage behavior through robust generative relevance analysis. In *The 5th IASTED International Conference on Web-Based Education, WBE* (pp. 183-188).
- Wang, L., & Sun, Q. (Marzo de 2022). Market Competition, Infrastructure Sharing, and Network Investment in China's Mobile Telecommunications Industry. *Sustainability*, 6, 3348. doi:<https://doi.org/10.3390/su14063348>
- Wang, S., Xiang, L., & Liu, X. (2018). A Hybrid Approach Optimized by Tissue-Like P System for Clustering. In *Intelligence Science and Big Data Engineering: 8th International Conference, IScIDE 2018, Lanzhou, China, August 18–19, 2018, Revised Selected Papers 8* (pp. 423-432). Springer International Publishing.
- Werner, P. A., & Porczek, M. (2019). Spatial patterns of development of mobile technologies for 5G networks. In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2019: 19th International Conference, Saint Petersburg, Russia, July 1–4, 2019, Proceedings, Part III 19* (pp. 448-459). Springer International Publishing.
- Wolfram, C., Shelef, O., & Gertler, P. (2012). How will energy demand develop in the developing world?. *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), 119-138.
- Ye, T., Westling, T., Page, L., & Keele, L. (2024). Nonparametric identification of causal effects in clustered observational studies with differential selection. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: Statistics in Society*, 187(4), 1013-1036.
- Zhou, B., Lu, B., & Saeidlou, S. (2024). A hybrid clustering method based on the several diverse basic clustering and meta-clustering aggregation technique. *Cybernetics and Systems*, 55(1), 203-229.

6. Anexos

A. Ilustración de una red de servicios móviles 4G.

Ilustración 15. Representación de una red de servicios de comunicación móvil con tecnología de acceso 4G.



Fuente: Elaboración a partir de Mobile Networks (Grigorik, 2021).

Elementos de la ilustración:

ETM – Equipo Terminal móvil: Dispositivos tecnológicos a través del cual el usuario interactúa con la red para enviar o recibir tráfico. Este tráfico puede ser generado en algunos de los tres servicios móviles: Internet, voz o SMS. Entre los dispositivos móviles se encuentran equipos celulares, tablets, computadoras portátiles, etc.

eNodeB: Hace referencia al conjunto de elementos conforman una estación base con tecnología 4G. Estos elementos controlan el tráfico de los dispositivos móviles a través de las celdas de acuerdo con cobertura de esta y la ubicación del usuario. En otras palabras, este elemento de red recibe y envía las transmisiones al ETM a través del espectro radioeléctrico (Grigorik, 2021).

Backhaul o red de transporte: De acuerdo con CRC, (2022), son los elementos de red que se encargan de conectar la red de acceso con el núcleo de la red. Estos elementos pueden usar diferentes tecnologías de transmisión, entre las cuales están: fibra óptica terrestre o submarina, enlaces de microondas y enlaces satelitales.

Elementos de la red core o núcleo central: En la Ilustración 15 se presentan los elementos principales del núcleo central de una red móvil. Siguiendo a Alcatel-Lucent, (2009), ITU, (2016) y Grigorik, (2021) de forma abreviada estos elementos son los siguientes:

SGW (Serving Gateway): Es elemento que actúa como puerta de entrada a la red central con núcleo 4G o LTE (*Long Term Evolution*), asignando las direcciones IP a los ETM, gestionando el tráfico para mantener la conexión a medida que el usuario se mueve entre celdas.

PCRF (Policy and Charging Rules Function): Administra las sesiones de los usuarios con el propósito de proveer una interfaz necesaria para validar los cargos y las facturas del sistema. En este mismo sentido, decide se asignan los recursos de la red a los usuarios, como las políticas de calidad o el ancho de banda asignado de acuerdo con los planes y políticas del operador.

MME (Policy and Charging Rules Function): Se encarga de establecer la seguridad para el acceso de usuarios. Este elemento se encarga de la movilidad de los usuarios dado que permite el inicio de sesiones cuando se cambia de una ubicación a otra.

PGW (Packet Gateway): Es el punto donde se termina la red. Es la puerta de salida para conectarse con las redes externas o con los centros de administración de datos donde se aloja el contenido de diferentes proveedores de aplicaciones.

Bajo un esquema de RAN, el proceso de interconexión entre redes se presenta de la siguiente manera:

1. Un equipo terminal móvil de un usuario que tiene sus servicios con un operador de origen se conecta a la red del operador visitado a través de los elementos de acceso.
2. Los elementos de acceso le permiten contar con una señal de servicio efectiva en el área de cobertura del operador visitado.
3. El tráfico generado por usuario se transmite a través de la red de transporte hasta llegar al núcleo de red del operador visitado, en donde es redirigido a través de la interfaz de

interconexión hacia la red del operador de origen del usuario para darle el debido enrutamiento.

4. En la red central del operador de origen se realiza el proceso de autenticación de la sesión, asignación de cargos y enrutamiento del tráfico hacia el destino final que puede ser otro usuario, a través de una llamada de voz o mensaje de texto, o un servidor de internet en donde se alojan los contenidos de las aplicaciones de vídeo o las consultas de una red social.

B. Evolución de la intervención regulatoria en materia de RAN

De acuerdo con la Ley 1341 de 2009, la intervención regulatoria en el mercado de los servicios de telecomunicaciones tiene sus fundamentos en los principios normativos asociados a la promoción de la competencia; la inversión; y el uso eficiente de la infraestructura y de los recursos escasos en el mercado de telecomunicaciones. Al tiempo, también se enmarcan en el fomento del acceso a servicios de telecomunicaciones en áreas rurales y de baja densidad de tráfico. Bajo este mismo marco, la Comisión de Regulación de Comunicaciones tiene la obligación de promover y regular la competencia en el sector de las comunicaciones, así como de prevenir prácticas desleales y restricciones comerciales. Para cumplir con este propósito, la CRC puede establecer normativas diferenciadas que se ajusten a la posición de las empresas en el mercado.

Siguiendo estos principios, se establece un marco regulatorio del RAN construido a lo largo del tiempo por distintos actos administrativos expedidos por la CRC. Estos antecedentes, se listan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Listado de intervenciones regulatorias de la CRC asociadas al RAN.

Resolución	Resumen de la intervención
Resolución CRT 469 de 2002	Establece el RAN como una instalación esencial para facilitar la interconexión entre operadores, impulsando la competencia y acceso a servicios.
Resolución CRC 3101 de 2011	Modifica las condiciones del RAN, incluyendo aspectos relacionados con las tarifas de interconexión y las condiciones de acceso para operadores entrantes.
Resolución CRC 4112 de 2013	Introduce modificaciones en el esquema tarifario del RAN, con énfasis en incentivar la expansión de cobertura en zonas rurales.
Resolución CRC 4660 de 2014	Ajusta las condiciones del uso compartido de infraestructura para optimizar el RAN y mejorar la cobertura en municipios de baja densidad poblacional.
Resolución CRC 5107 de 2017	Establece una senda de valores tope de remuneración del RAN y aplica la regla de los 3 sectores para incentivar la entrada de nuevos operadores.
Resolución CRC 5827 de 2019	Realiza una revisión de las tarifas y condiciones del RAN, enfocándose en garantizar la equidad en el acceso para los nuevos operadores y en mejorar la cobertura.
Resolución CRC 6298 de 2021	Delimita la aplicación geográfica de la tarifa regulada del RAN a un listado de 460 municipios, considerando niveles de competencia e infraestructura.
Resolución CRC 7007 de 2022	Ajusta las condiciones tarifarias y de acceso para el RAN, introduciendo mecanismos para mejorar la eficiencia y cobertura en áreas de baja demanda.
Resolución CRC 7007 de 2023	Actualiza la regulación del RAN para facilitar el acceso en zonas rurales y promover una mayor competitividad entre operadores mediante ajustes tarifarios.
Resolución CRC 7285 de 2024	Implementa un nuevo enfoque tarifario del RAN para fomentar la inversión en infraestructura 5G, con un esquema que incentiva la competencia y el despliegue.

C. Fórmulas de los algoritmos de clasificación de municipios: K-means y K-medoids.

A continuación, se realiza una descripción de los algoritmos empleados para la clasificación de municipios, con el propósito de segmentar los ámbitos de aplicación de la tarifa regulada y tarifa negociada.

1. Método K-means:

El método *k-means* busca dividir los datos en k grupos (clusters) de tal forma que la suma de las distancias cuadradas (varianza interna) entre los puntos de datos y el centroide de cada clúster se minimice. La fórmula para calcular la función objetivo de minimización en *k-means* es:

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2$$

- $\|x - \mu_i\|$: Representa la distancia euclidiana entre un punto x y el centroide μ_i de clúster C_i .
- $\min$: Indica que el objetivo es encontrar la configuración de clústeres que minimiza la suma total de estas distancias cuadradas al cuadrado. Es decir que la partición óptima está determinada por el método de suma total de cuadrados internos.

Para mayor claridad la Distancia Euclidiana también puede ser expresada cómo:

$$\|x - \mu_i\| = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - \mu_{ij})^2}$$

Donde:

x_j : es la coordenada del punto en la variable j

μ_{ij} : es la coordenada del centroide en la variable j

2. Método *K-medoids*:

Este método utiliza puntos reales como *medoides* o centros de cada clúster, lo que hace que este método sea más efectivo frente a valores atípicos. En este caso, para este método de clasificación se usó la distancia Manhattan como medida de similitud. La fórmula de distancia Manhattan se describe como:

$$D(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

Donde:

$D(x, y)$: Representa la distancia Manhattan entre dos puntos

$|x_i - y_i|$: Es el valor absoluto de la diferencia entre las coordenadas correspondientes de los puntos.

El objetivo en el método *K-medoids* es encontrar *medoides* (representantes) de cada clúster que minimicen la suma de las distancias Manhattan de los puntos al medoide del clúster:

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} D(x, m_i)$$

Donde:

$D(x, m_i)$: Es la distancia Manhattan entre un punto x_i y el *medoide* m_i del clúster C_i .

$\min$: Es la función objetivo que garantiza que el número de particiones establecidas minimice la suma total las distancias Manhattan.

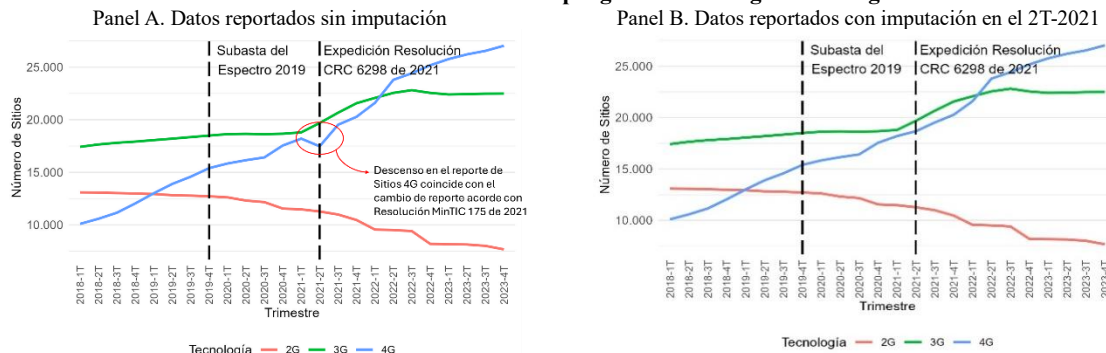
D. Listado de municipios que pertenece al clúster 7 del método *K-medoids*.

N°	Departamento	Municipio	N°	Departamento	Municipio	Departamento	N°	Municipio
1	Antioquia	Bello	8	Cesar	Valledupar	Norte De Santander	15	San José De Cúcuta
2	Antioquia	Envigado	9	Córdoba	Montería	Quindío	16	Armenia
3	Antioquia	Itagüí	10	Cundinamarca	Soacha	Risaralda	17	Pereira
4	Atlántico	Soledad	11	Huila	Neiva	Santander	18	Bucaramanga
5	Bolívar	Cartagena De Indias	12	Magdalena	Santa Marta	Santander	19	Floridablanca

6	Caldas	Manizales	13	Meta	Villavicencio	Tolima	20	Ibagué
7	Cauca	Popayán	14	Nariño	Pasto	Valle Del Cauca	21	Palmira

E. Contraste gráfico de la tendencia del despliegue de elementos de infraestructura de acceso por tecnología reportado por los PRSTM.

Ilustración 16. Evolución del despliegue de sitios según tecnología



Fuente: Elaboración propia con base en la información publicada en www.postdata.gov.co.

F. Tráfico de datos móviles cursados en RAN entre el Proveedor de Red de Origen (PRO) y el Proveedor de Red Visitado (PRV).

Tabla 6. Tráfico de Datos Móviles desde la red de origen, cursados en RAN medidos en Terabytes

Proveedor de Red de Origen	2018	2019	2020	2021	2022	2023
AVANTEL	5.199,3	5.624,0	4.192,6	3.115,8	114,1	
CLARO	1,6	121,5	215,7	242,3	154,1	149,6
MOVISTAR	243,0	610,2	665,6	768,8	916,0	1.185,2
TIGO	373,2	1.134,9	1.083,3	674,2	727,0	898,6
WOM				5.467,9	13.552,0	16.292,1
Total	5.817,2	7.490,5	6.157,1	10.268,9	15.463,2	18.525,6

Fuente: Elaboración propia con base en la información publicada en www.postdata.gov.co

Nota: No incluye el tráfico generado por ETB, tampoco el cursado entre Avantel y WOM

Tabla 7. Tráfico de Datos Móviles desde la red visitada, cursados en RAN medidos en Terabytes

Proveedor de Red de Visitado	2018	2019	2020	2021	2022	2023
CLARO	1.154,0	3.217,9	3.481,4	5.236,3	5.383,4	5.341,9
MOVISTAR	2.549,4	2.755,2	2.632,4	3.519,5	6.700,3	9.030,0
TIGO	2.113,8	1.517,4	43,3	1.513,1	3.379,6	4.117,1
WOM						36,6
Total	5.817,2	7.490,5	6.157,1	10.268,9	15.463,2	18.525,6

Fuente: Elaboración propia con base en la información publicada en www.postdata.gov.co

Nota: No incluye el tráfico generado por ETB, tampoco el cursado entre Avantel y WOM

G. Prueba de las tendencias paralelas con placebo anticipando un año la entrada en vigor de la Resolución CRC 6298 de 2021.

	(1) Densidad de los Sitios 4G per cápita	(2) Densidad de los Sectores 4G per cápita	(3) Tráfico de Datos per Cápita
_lead2	0,195* (2,05)	0,814* (2,51)	-129,6 (-1,97)
_lag0	0,0440 (0,24)	-0,0128 (-0,03)	-42,02 (-0,56)
_lag1	-0,297 (-1,25)	-1,666 (-1,79)	-9,852 (-0,11)
_lag2	-0,705* (-2,07)	-4,490** (-2,70)	265,7** (3,23)
_lag3	-0,970* (-2,56)	-6,388* (-2,41)	767,2*** (3,99)
Constant	-1,942 (-0,07)	-23,21 (-0,14)	6942,1 (1,19)
N	426	426	426
r2	0,456	0,516	0,457

t statistics in parentheses
* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$