



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Industrias

**ANÁLISIS ESPACIAL DE LA BRECHA DIGITAL EN CHILE:
DESIGUALDADES TERRITORIALES EN ACCESO Y CALIDAD
DE INTERNET Y SU RELACIÓN CON FACTORES
SOCIOECONÓMICOS Y GEOGRÁFICOS**

Memoria de Título presentada por

Alfredo Ignacio Mallea Osses

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil Industrial

Profesor Guía
David Godoy

SEPTIEMBRE, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis espacial de la brecha digital en Chile: Desigualdades territoriales en acceso y calidad de internet y su relación con factores socioeconómicos y geográficos.

Nombre del candidato(a): Alfredo Ignacio Mallea Osses

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Vitacura **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, David Godoy R., en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 07-08-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/07/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

**ANÁLISIS ESPACIAL DE LA BRECHA DIGITAL EN CHILE: DES-
IGUALDADES TERRITORIALES EN ACCESO Y CALIDAD DE
INTERNET Y SU RELACIÓN CON FACTORES SOCIOECONÓ-
MICOS Y GEOGRAFICOS**

AUTOR:

ALFREDO IGNACIO MALLEA OSSES

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de
INGENIERIA CIVIL INDUSTRIAL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Profesor Guía

Miembro 1 Comisión

Miembro 2 Comisión

Santiago, Chile, (FECHA DEFENSA)

Agradecimientos

Quisiera expresar mis más profundos agradecimientos a todas las personas que me acompañaron, apoyaron y sostuvieron durante este largo proceso. A quienes estuvieron presentes en los momentos de mayor incertidumbre, a quienes me motivaron, y a quienes, de una u otra forma, me ayudaron a llegar hasta esta etapa que durante mucho tiempo pareció lejana y difícil. En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, por haber estado conmigo desde el inicio, incluso desde aquella etapa de postulación a la universidad en la que comenzaba este camino lleno de dudas y desafíos. Gracias por confiar en mí, por apoyarme en cada decisión, por entregarme las herramientas necesarias para avanzar y por impulsarme siempre a seguir adelante, incluso cuando yo mismo dudaba. Este logro también es de ustedes, porque sin su esfuerzo, compañía y amor incondicional, nada de esto habría sido posible. Además de agradecerle a mis Hermanos que eran una de las razones por las que no bajaba los brazos ni perdía la motivación de sacar la carrera adelante.

Agradezco también con mucho cariño a mis abuelas, quienes hoy pueden ver a su nieto cumplir una meta tan importante como titularse. Su amor, preocupación y alegría han sido parte fundamental de este proceso. Del mismo modo, quiero dedicar un agradecimiento especial a mis abuelos, que hoy me acompañan desde el cielo. Estoy seguro de que nunca me soltaron la mano, que estuvieron presentes en cada paso y que, desde arriba, me impulsaron a no rendirme, incluso en los momentos en que el cansancio, el miedo o la frustración parecían más grandes que mis fuerzas. Aguante Magallanes y Audita.

También quiero agradecer a mis amigos y compañeros que fui conociendo a lo largo de este camino, tanto dentro de la universidad como fuera de ella. Cada conversación, consejo, risa, palabra de ánimo y momento compartido hizo que este proceso fuera más llevadero y significativo. La universidad no solo me entregó formación académica, sino también personas valiosas que marcaron distintas etapas de mi vida. A mis compañeros de trabajo y amigos de adidas, les agradezco profundamente por el apoyo, la comprensión y las facilidades que me entregaron para poder terminar mis estudios. Gracias por permitirme compatibilizar mis responsabilidades laborales con este proceso académico, sin poner obstáculos y siempre mostrando disposición.

A mi pareja, gracias por ser una de las personas más importantes en este camino. La universidad no solo me permitió formarme como profesional, sino también conocerte, compartir contigo este proceso y construir juntos una historia que ha estado marcada por esfuerzo, compañía y el deseo de avanzar hacia un futuro en común. Gracias por estar a mi lado en los momentos buenos y, sobre todo, en aquellos en que más necesitaba apoyo. Gracias por motivarme, por creer en mí, por acompañarme en mis dudas y por seguir luchando conmigo por nuestros sueños, por nuestro futuro y por el camino que ambos estamos construyendo como ingenieros.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, directa o indirectamente, fueron parte de este proceso tanto profesores como ayudantes. A quienes creyeron en mí, a quienes me acompañaron en silencio, a quienes me dieron una palabra de aliento cuando más la necesitaba y a quienes me recordaron que era capaz de llegar hasta aquí. Este logro representa años de esfuerzo, aprendizajes, caídas y perseverancia, pero también representa el amor, el apoyo y la confianza de todos quienes estuvieron conmigo en el camino.

Gracias a todos. Este logro también les pertenece.

Resumen Ejecutivo

La presente memoria analiza la brecha digital en Chile desde una perspectiva espacial, entendiendo la conectividad a Internet no solo como un servicio tecnológico, sino como una infraestructura habilitante para el desarrollo económico, social, educativo y territorial. En un contexto donde el acceso digital condiciona crecientemente la participación ciudadana, la productividad, la educación, el trabajo y el acceso a servicios públicos, las diferencias territoriales en conectividad adquieren una importancia estratégica. Si bien Chile ha avanzado en cobertura y despliegue de infraestructura digital, persisten desigualdades relevantes entre comunas, especialmente en territorios rurales, dispersos o socialmente vulnerables. Por ello, esta investigación busca superar los diagnósticos basados en promedios nacionales o regionales, incorporando explícitamente la dimensión geográfica en el análisis de la desigualdad digital. Donde el objetivo general del estudio consiste en analizar la brecha digital en Chile mediante modelación espacial del acceso a Internet y su relación con factores territoriales y socioeconómicos, utilizando técnicas de regresión espacial y Sistemas de Información Geográfica. Para ello, se construyó una base comunal integrada a partir de fuentes secundarias oficiales correspondientes al año 2024, considerando información de la Subsecretaría de Telecomunicaciones, el Instituto Nacional de Estadísticas y la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional. La unidad de análisis fue la comuna, y la variable dependiente correspondió a la penetración de banda ancha fija, utilizada como aproximación del acceso territorial a conectividad fija. Como variables explicativas se incorporaron el porcentaje de población rural, la pobreza por ingresos y la pobreza multidimensional, por representar dimensiones territoriales y socioeconómicas relevantes para comprender la exclusión digital.

La metodología que aplicada combinó estadística descriptiva, cartografía temática, análisis exploratorio de datos espaciales y modelos econométricos espaciales. En primer lugar, se construyó, depuró y validó una base georreferenciada de 345 comunas, excluyendo observaciones que no cumplieran con los criterios de consistencia estadística y cartográfica. Luego, se caracterizó la distribución territorial de la penetración de banda ancha fija, identificando una marcada heterogeneidad entre comunas. Los resultados descriptivos evidenciaron diferencias sustantivas en los niveles de conectividad, con comunas que presentan indicadores relativamente altos de penetración y otras donde el acceso fijo continúa siendo muy limitado. Esta primera evidencia permitió confirmar que la brecha digital no se expresa de manera uniforme en el territorio nacional. Posteriormente, el análisis espacial permitió comprobar que la desigualdad digital posee una estructura territorial estadísticamente significativa. El Índice de Moran Global alcanzó un valor de 0,4346, con significancia estadística, lo que indica autocorrelación espacial positiva en la penetración comunal de banda ancha fija. Esto significa que las comunas con niveles similares de conectividad tienden a ubicarse próximas entre sí, formando patrones de concentración territorial. Complementariamente, los indicadores locales de asociación espacial permitieron identificar clústeres de alta y baja conectividad. En particular, se observaron 44 comunas en clústeres High-High y 36 comunas en clústeres Low-Low, lo que confirma la existencia de territorios de ventaja digital y territorios de rezago persistente. Estos resultados son relevantes porque muestran que la brecha digital no corresponde únicamente a casos aislados, sino a una configuración espacial organizada.

En la etapa econométrica, se estimó inicialmente un modelo OLS como referencia base. Este modelo mostró asociaciones negativas entre la penetración de banda ancha fija, la ruralidad y la pobreza por ingresos, alcanzando un R^2 cercano al 48 %. Sin embargo, los diagnósticos del modelo evidenciaron heterocedasticidad y dependencia espacial residual, lo que indicó que una especificación

lineal convencional era insuficiente para representar adecuadamente el fenómeno. En consecuencia, se estimaron modelos espaciales globales de tipo SAR y SEM. Ambos modelos mejoraron el desempeño del OLS y confirmaron la relevancia de incorporar estructura espacial en la modelación. El modelo SEM presentó el mejor ajuste global según el criterio de información de Akaike, lo que sugiere que una parte importante de la dependencia territorial se manifiesta a través de factores no observados con estructura espacial, tales como historia de inversión, calidad efectiva de infraestructura, presencia de operadores, condiciones geográficas o capacidades institucionales locales. Para complementar la lectura global, se estimó un modelo de regresión geográficamente ponderada, el cual permitió analizar la heterogeneidad espacial de los coeficientes. Este modelo alcanzó un R^2 global de 0,6865 y un AICc de -993,4463, superando el ajuste de las especificaciones anteriores. Sus resultados muestran que los determinantes de la brecha digital no operan con la misma intensidad en todo el país. La ruralidad aparece como el factor más establemente asociado a menores niveles de conectividad fija, manteniendo un efecto negativo en todo el territorio, aunque con distinta magnitud según la comuna. La pobreza por ingresos y la pobreza multidimensional también presentan asociaciones promedio negativas, pero con mayor variación local, lo que refleja que su incidencia depende del contexto territorial específico. De este modo, la investigación demuestra que la brecha digital chilena es desigual, espacialmente dependiente y territorialmente heterogénea.

Los hallazgos obtenidos tienen implicancias directas para la política pública. En primer lugar, sugieren que las estrategias homogéneas de conectividad pueden resultar insuficientes para enfrentar un fenómeno cuyas causas varían entre territorios. En comunas donde la ruralidad opera como barrera estructural, las intervenciones deberían priorizar inversiones de infraestructura, expansión de redes y reducción de costos de despliegue. En territorios donde la pobreza por ingresos limita el acceso efectivo, las políticas de infraestructura deberían complementarse con instrumentos de asequibilidad, subsidios focalizados o mecanismos de apoyo a la demanda. Finalmente, en comunas donde predominan carencias multidimensionales, la conectividad debe articularse con estrategias de alfabetización digital, fortalecimiento institucional local y capacidades de uso.

Desde la perspectiva de la Ingeniería Civil Industrial, esta memoria aporta una mirada aplicada al problema de la conectividad, vinculando análisis de datos, modelación espacial, eficiencia en la asignación de recursos y toma de decisiones públicas. La brecha digital puede entenderse como un problema de planificación y priorización bajo restricciones presupuestarias, donde no basta con identificar territorios rezagados, sino que también es necesario distinguir el tipo de barrera que afecta a cada comuna. En este sentido, el estudio transforma información territorial dispersa en evidencia útil para orientar intervenciones más eficientes, equitativas y coherentes con la realidad comunal del país.

Finalmente, se reconoce que los resultados deben interpretarse como evidencia de asociación estadística y territorial, no como prueba causal concluyente. Las principales limitaciones se relacionan con el uso de datos secundarios, la escala comunal de análisis, la imposibilidad de capturar desigualdades intra-comunales y la ausencia de variables directas sobre calidad efectiva del servicio, velocidad real, precios, competencia entre operadores y alfabetización digital. No obstante, estas restricciones no reducen el aporte central de la investigación: demostrar que la dimensión espacial es fundamental para comprender la brecha digital en Chile. En consecuencia, la superación de esta desigualdad requiere avanzar desde una lógica de cobertura agregada hacia una estrategia de justicia espacial, basada en evidencia territorial y orientada a maximizar el retorno social de la inversión pública en telecomunicaciones.

Abstract

El acceso a Internet se ha consolidado como un pilar crítico para el desarrollo socioeconómico y la participación ciudadana en la sociedad del conocimiento. Sin embargo, este avance no ha sido uniforme en el territorio chileno, emergiendo los denominados "desiertos digitales": zonas de desconexión absoluta que constituyen la manifestación más crítica de la desigualdad tecnológica del país. Pese a su relevancia, la complejidad territorial de este fenómeno no había sido abordada mediante análisis geoespaciales rigurosos, lo que limitaba la comprensión de sus patrones de desigualdad y dificultaba el diseño de políticas públicas efectivamente focalizadas y basadas en evidencia territorial.

Frente a esta carencia, la presente investigación cuantificó y modeló la distribución de la brecha digital a nivel comunal en todo el territorio nacional, con el objetivo de analizarla mediante modelación espacial del acceso a Internet y su relación con factores territoriales y socioeconómicos, utilizando técnicas de regresión espacial y Sistemas de Información Geográfica (SIG), para identificar patrones de desigualdad y fundamentar propuestas de política pública orientadas a la equidad en conectividad.

Los resultados confirmaron que la penetración comunal de banda ancha fija presenta una estructura territorial estadísticamente significativa: el Índice de Moran Global alcanzó un valor de 0,4346, evidenciando autocorrelación espacial positiva, y los indicadores LISA permitieron identificar 44 comunas en clústeres de alta conectividad (High-High) y 36 en clústeres de rezago persistente (Low-Low). La estimación econométrica mostró que un modelo lineal convencional resultaba insuficiente para representar el fenómeno, por lo que se avanzó hacia modelos espaciales globales (SAR y SEM) y, posteriormente, hacia un modelo de regresión geográficamente ponderada (GWR), el cual alcanzó el mejor ajuste del estudio ($R^2 = 0,6865$), demostrando que variables como la ruralidad y la pobreza operan con distinta intensidad según el territorio, amplificando la exclusión en zonas geográficamente marginadas.

A partir de esta evidencia, se concluye que la superación de la brecha digital exige un cambio de paradigma hacia la "justicia espacial", mediante intervenciones descentralizadas que trasciendan las soluciones de cobertura nacional estandarizadas y reconozcan las particularidades de cada territorio. En consecuencia, se proponen lineamientos estratégicos para optimizar la focalización de recursos estatales en telecomunicaciones y criterios territoriales para el diseño de políticas públicas de conectividad basadas en evidencia espacial.

Índice

1. Introducción	7
1.1. La brecha digital como fenómeno socio-espacial multidimensional	7
1.2. Modelamiento de la dependencia territorial en la gestión de infraestructura	7
1.3. Implicancias estratégicas y el paradigma de la justicia espacial	8
1.4. Planteamiento del Problema	8
2. Objetivos	9
2.1. Objetivo General	9
2.2. Objetivos Específicos	9
3. Desarrollo de la Necesidad y Marco de Referencia	10
3.1. Alcance y Limitaciones de la Investigación	10
3.1.1. Alcance de la Investigación	10
3.1.2. Limitaciones del Estudio	11
3.2. Conectividad digital y exclusión estructural	11
3.2.1. La brecha digital como fenómeno multidimensional	11
3.2.2. Factores estructurales de exclusión digital	12
3.2.3. Del acceso desigual a los desiertos digitales	13
3.3. Territorio, dependencia espacial y modelación de la brecha digital	15
3.3.1. La dimensión geoespacial de la brecha digital	15
3.3.2. Dependencia territorial y efecto vecindad en infraestructura digital	15
3.3.3. La regresión espacial como herramienta para analizar desigualdades territoriales	16
3.4. Infraestructura, inclusión y política pública para la equidad digital	16
3.4.1. Infraestructura digital y desigualdad en la provisión de conectividad	16
3.4.2. Inclusión digital y alfabetización tecnológica más allá del acceso	17
3.4.3. Justicia espacial y focalización territorial de la intervención pública	18
3.5. Síntesis de la necesidad de investigación	18
4. Metodología	20
4.1. Diseño metodológico general	20
4.2. Construcción de la base y variables de análisis	21
4.3. Estrategia de análisis espacial y econométrico	22
4.4. Criterios de evaluación y limitaciones	23
5. Desarrollo, análisis y resultados	24
5.1. Construcción, depuración y validación de la base de análisis espacial	24
5.2. Caracterización descriptiva y distribución territorial de la brecha digital	26
5.3. Dependencia espacial del fenómeno	29
5.3.1. Especificación de la matriz de pesos espaciales	29
5.3.2. Autocorrelación espacial global: Índice de Moran	29
5.3.3. Autocorrelación espacial local: clústeres LISA	31
5.4. Especificación y diagnóstico del modelo econométrico espacial	32
5.4.1. Definición del modelo base y variables explicativas	33
5.4.2. Evaluación de multicolinealidad	33
5.4.3. Diagnóstico del modelo OLS y tests de dependencia espacial	34
5.5. Estimación y comparación de modelos espaciales globales	35

5.5.1. Resultados del modelo SAR	36
5.5.2. Resultados del modelo SEM	37
5.5.3. Comparación entre modelos globales y criterio de selección	38
5.6. Heterogeneidad espacial local: modelo GWR	40
5.6.1. Calibración, ajuste y desempeño del modelo	40
5.6.2. Variación espacial de los coeficientes locales e interpretación territorial	42
5.7. Robustez, alcances e implicancias para la política pública	46
5.7.1. Robustez estadística, límites inferenciales y alcance analítico	46
5.7.2. Implicancias para la focalización territorial de políticas públicas	47
6. Conclusiones	50
Referencias	54

1. Introducción

La transición global hacia la denominada Sociedad de la Información ha reconfigurado los paradigmas de producción, comunicación y ejercicio ciudadano. En este contexto, la conectividad digital ha dejado de ser un servicio periférico para transformarse en una infraestructura crítica y habilitante, cuya omnipresencia condiciona la competitividad de las naciones y el bienestar de sus habitantes (Organisation for Economic Co-operation and Development, 2021a; International Telecommunication Union, 2023). Sin embargo, el despliegue de estas tecnologías en Chile ha operado bajo una lógica de mercado fragmentada que, si bien ha logrado altas tasas de penetración agregada, ha profundizado brechas históricas de carácter estructural.

Como futuros ingenieros, entendemos que la eficiencia en la asignación de recursos es vital para el desarrollo país. No obstante, en el ámbito de las telecomunicaciones, esta eficiencia se ve comprometida por la aparición de los denominados **desiertos digitales**: zonas de exclusión donde la ausencia de infraestructura o la precariedad de la red anulan cualquier posibilidad de desarrollo productivo local (Baeza-Yates, 2020; Villalobos y Hernández, 2021). La presente investigación surge de la necesidad de trascender los diagnósticos estadísticos tradicionales, integrando la dimensión espacial como un factor determinante para comprender y mitigar la desigualdad tecnológica en Chile. A continuación, se articula el estado del arte y el planteamiento del problema a través de los ejes que fundamentan este estudio.

1.1. La brecha digital como fenómeno socio-espacial multidimensional

La comprensión contemporánea de la brecha digital ha evolucionado desde una visión puramente binaria del acceso hacia un análisis de interseccionalidad social y geográfica. Helsper (2021) sostiene que la exclusión tecnológica actual es el resultado de causas sociales profundas donde el ingreso, la educación y el territorio no solo se suman, sino que potencian la vulnerabilidad de la población. En Chile, esta multidimensionalidad se manifiesta con particular fuerza en los entornos rurales, donde la dependencia de conexiones móviles precarias limita el desarrollo de habilidades digitales avanzadas, perpetuando un círculo de exclusión que los datos nacionales promediados tienden a invisibilizar (Correa, Pavez, y Contreras, 2020). Por tanto, analizar la brecha digital hoy exige considerar cómo la ubicación geográfica actúa como un multiplicador de las carencias socioeconómicas preexistentes.

1.2. Modelamiento de la dependencia territorial en la gestión de infraestructura

Desde la gestión de operaciones y el análisis de sistemas, es imperativo reconocer que los fenómenos territoriales no ocurren de forma aislada. El estado del arte en econometría espacial subraya la relevancia de la dependencia territorial, donde la conectividad de una comuna está intrínsecamente ligada a la infraestructura de su entorno regional. Investigaciones recientes en el contexto hispanoamericano demuestran que ignorar este "efecto vecindad" conduce a errores sistemáticos en la modelación de la brecha digital, ya que las inversiones en telecomunicaciones tienden a generar externalidades espaciales significativas (Arellano-Gualdrón y Silva, 2021; Billón, Lera-López, y Marco, 2021). La integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos de regresión espacial como el GWR permite, por primera vez, capturar la heterogeneidad del territorio chileno, diferenciando cómo los factores determinantes de la brecha operan de forma distinta en el norte minero, el centro metropolitano o el sur rural.

1.3. Implicancias estratégicas y el paradigma de la justicia espacial

La optimización de la inversión pública en telecomunicaciones requiere un marco ético y técnico que garantice el retorno social del capital. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2021) advierte que la asimetría digital local es uno de los principales frenos para la descentralización productiva y la adopción de la Industria 4.0. Frente a este desafío, el concepto de **justicia espacial** surge como el eje rector de la nueva política pública, postulando que la coordenada geográfica de un ciudadano no debe ser un determinante de sus derechos fundamentales. Siguiendo a Edward Soja (2010), la equidad digital solo se alcanzará cuando la planificación territorial reconozca que el espacio no es un contenedor neutral, sino un producto social que debe ser gestionado para eliminar las barreras geográficas que impiden el desarrollo humano equitativo.

1.4. Planteamiento del Problema

A pesar del despliegue de iniciativas de gran escala como la Fibra Óptica Nacional y la declaración de Internet como Servicio Público, Chile carece de un modelamiento cuantitativo robusto que integre la dimensión espacial en sus diagnósticos oficiales. El problema central reside en que la toma de decisiones estratégicas continúa basándose en indicadores agregados que omiten la autocorrelación espacial y el efecto de vecindad de las infraestructuras. Esta carencia analítica deriva en una asignación ineficiente de recursos estatales, aplicando soluciones estandarizadas a territorios cuyas causas de desconexión son estructuralmente disímiles.

En ausencia de un análisis que modele la interacción entre geografía y niveles socioeconómicos, el Estado se ve incapacitado para predecir el impacto de sus políticas en la reducción efectiva de los desiertos digitales. En consecuencia, esta investigación se propone como un instrumento técnico indispensable para cuantificar la brecha digital comunal mediante modelos de regresión espacial, permitiendo identificar patrones de desigualdad hasta ahora invisibles y fundamentar una política pública orientada genuinamente a la justicia espacial.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Analizar la brecha digital en Chile mediante modelación espacial del acceso a Internet y su relación con factores territoriales, utilizando técnicas de regresión espacial y Sistemas de Información Geográfica (SIG), para identificar patrones de desigualdad y fundamentar propuestas de política pública que promuevan la equidad en conectividad.

2.2. Objetivos Específicos

- Cuantificar el estado actual de la brecha digital a nivel comunal en Chile mediante la construcción empírica de indicadores espaciales de acceso a conectividad fija.
- Identificar la existencia de clústeres territoriales de alta y baja conectividad aplicando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de autocorrelación espacial local.
- Estimar la asociación estadística entre variables socioeconómicas y territoriales y la desigualdad digital comunal mediante la aplicación de modelos econométricos espaciales globales y locales.
- Diseñar lineamientos estratégicos de política pública focalizados espacialmente, basados en los resultados del modelamiento, para optimizar la futura asignación de recursos estatales en infraestructura de telecomunicaciones.

3. Desarrollo de la Necesidad y Marco de Referencia

Para dar respuesta a la problemática planteada y estructurar una propuesta metodológica rigurosa, es fundamental delimitar las fronteras del estudio y establecer las bases conceptuales que explican la exclusión tecnológica en el país. En este sentido, el presente capítulo desarrolla la "necesidad" de la investigación desde dos frentes: primero, estableciendo el alcance y las limitaciones geográficas y técnicas del modelamiento; y segundo, desplegando el marco teórico que desglosa las dimensiones socioeconómicas, territoriales y de infraestructura que configuran la actual brecha digital en Chile.

3.1. Alcance y Limitaciones de la Investigación

Antes de profundizar en los fundamentos teóricos empíricos que sustentan este estudio, resulta indispensable demarcar las fronteras de la investigación. Definir el alcance permite establecer con precisión el ámbito de acción, la unidad de análisis y los parámetros técnicos del modelamiento geoespacial. Paralelamente, la declaración de las limitaciones metodológicas garantiza la transparencia y el rigor científico del estudio, reconociendo desde un inicio las restricciones inherentes al uso de datos secundarios y a la agregación espacial. A continuación, se detallan ambos aspectos para enmarcar adecuadamente las expectativas y la validez de los resultados posteriores.

3.1.1. Alcance de la Investigación

La presente investigación se circunscribe geográficamente al conjunto de comunas del territorio continental e insular de Chile representadas en las bases estadísticas y cartográficas oficiales disponibles para el período de estudio, utilizando a la comuna como unidad de análisis espacial. Desde una perspectiva temporal, el trabajo adopta un diseño empírico de corte transversal basado en información correspondiente al año 2024, proveniente de fuentes secundarias oficiales. En particular, se integran métricas de conectividad reportadas por la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), variables territoriales y demográficas provenientes del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), y antecedentes socioeconómicos obtenidos desde la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN).

En términos analíticos, el estudio se enfoca en la cuantificación y modelación espacial de la brecha digital comunal en Chile, entendida principalmente a partir de indicadores de acceso a conectividad fija y su relación con variables territoriales y socioeconómicas. Para ello, se emplea un enfoque secuencial que combina herramientas de análisis exploratorio de datos espaciales y econometría espacial. En una primera etapa, se caracteriza la distribución territorial del fenómeno mediante cartografía temática, estadística descriptiva, autocorrelación espacial global e indicadores locales de asociación espacial. En una segunda etapa, se estiman modelos econométricos espaciales globales de tipo SAR y SEM, con el propósito de identificar y cuantificar la dependencia espacial y el efecto de variables explicativas asociadas a ruralidad y condiciones socioeconómicas. Finalmente, se implementa un modelo de regresión geográficamente ponderada (GWR) para examinar la heterogeneidad espacial de dichos efectos a escala local.

El alcance del estudio es explicativo en términos estadísticos y territoriales, pero no causal en sentido estricto. En consecuencia, la investigación busca identificar patrones espaciales, asociaciones sistemáticas y diferencias territoriales en la manifestación de la brecha digital, con el fin de aportar evidencia para la focalización de políticas públicas de conectividad y para una interpretación territorialmente diferenciada del problema.

Por consiguiente, quedan fuera del alcance de esta memoria el levantamiento de información primaria en terreno, la evaluación técnica directa de infraestructura de telecomunicaciones a nivel de hardware o red física, la modelación longitudinal de trayectorias históricas de conectividad, y la estimación de impactos causales mediante diseños experimentales o cuasi-experimentales.

3.1.2. Limitaciones del Estudio

La ejecución y alcance explicativo de esta investigación están sujetos a restricciones metodológicas inherentes al uso de datos secundarios y al modelamiento territorial macroscópico, las cuales deben ser consideradas al interpretar los resultados:

- **Granularidad y Problema de la Unidad de Área Modificable (MAUP):** Al definir la comuna como la unidad mínima de análisis geográfico, los modelos capturarán con precisión la varianza inter-comunal, pero invisibilizarán la heterogeneidad intra-comunal. Es altamente probable la existencia de micro-desiertos digitales en la periferia de comunas que, en su promedio agregado, exhiben indicadores favorables de conectividad.
- **Dependencia de Fuentes Secundarias:** La robustez de la regresión espacial está supeditada a la actualización, periodicidad y exhaustividad de las bases de datos gubernamentales. Variables cualitativas de alta relevancia teórica, tales como el nivel específico de alfabetización digital de los usuarios o las barreras psicológicas de adopción, carecen de un registro georreferenciado censal a nivel nacional, limitando el modelo a variables proxy sociodemográficas.
- **Sensibilidad topológica de la Matriz de Pesos Espaciales (W):** La precisión de los estimadores en los modelos SAR y SEM depende matemáticamente de la arquitectura de la matriz de vecindad. Dado que la particular geografía fragmentada de Chile impide el uso de criterios de contigüidad física estricta (fronteras compartidas), la adopción de algoritmos de K -vecinos más cercanos o umbrales de distancia inversa introduce un nivel de sensibilidad paramétrica en los resultados espaciales obtenidos.

3.2. Conectividad digital y exclusión estructural

3.2.1. La brecha digital como fenómeno multidimensional

La brecha digital ha dejado de entenderse como una simple separación entre quienes tienen acceso a Internet y quienes no. En su formulación contemporánea, corresponde a un fenómeno multidimensional que articula desigualdades de acceso, calidad, habilidades y uso, configurando distintas formas de exclusión dentro de la sociedad digital. Esta evolución conceptual resulta especialmente relevante porque permite comprender que la conectividad no se agota en la mera existencia de una conexión, sino que involucra también la estabilidad del servicio, la calidad técnica disponible, la posibilidad efectiva de apropiación y el uso socialmente significativo de las tecnologías.

En esta línea, Van Dijk (2020) plantea que la desigualdad digital se expresa en distintos niveles, que van desde el acceso material a dispositivos y redes hasta las competencias y oportunidades reales de uso. Esta perspectiva es especialmente útil para el caso chileno, donde los indicadores agregados de cobertura tienden a mostrar avances importantes, pero donde persisten brechas sustantivas cuando se observa la calidad de la conexión, la continuidad del servicio o las posibilidades concretas de aprovechar digitalmente dicha conectividad. En consecuencia, el análisis de la brecha digital exige

superar una lectura binaria y adoptar una visión que reconozca su carácter estructural, acumulativo y territorialmente diferenciado.

La desigualdad en el acceso también presenta una dimensión socioeconómica evidente. Como se observa en la Figura 1, el acceso a Internet en América Latina sigue distribuyéndose de forma desigual entre los distintos quintiles de ingreso, lo que refuerza la idea de que la conectividad no depende exclusivamente de la existencia de redes, sino también de condiciones materiales que permiten pagar, sostener y aprovechar el servicio. Esta evidencia resulta coherente con la noción de que la brecha digital se superpone con otras formas de desigualdad preexistente y que, por lo mismo, debe analizarse como parte de una estructura más amplia de exclusión social.

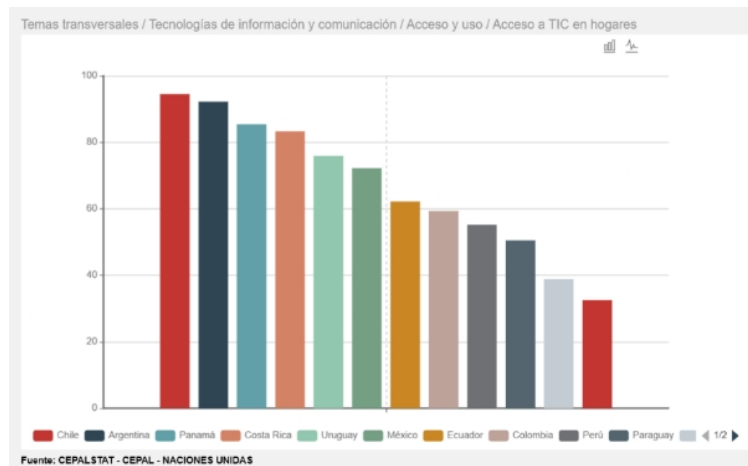


Figura 1: Porcentaje de acceso a Internet en América Latina según quintil de ingreso (2022).

Fuente: CEPAL (2021).

3.2.2. Factores estructurales de exclusión digital

La exclusión digital no se distribuye homogéneamente entre la población, sino que responde a un conjunto de condicionantes estructurales que operan de manera simultánea. Entre los más relevantes destacan el nivel de ingresos, la escolaridad, la edad, el género y el lugar de residencia. Estos factores no actúan de forma aislada, sino que se intersectan y refuerzan mutuamente, generando desventajas acumulativas que dificultan tanto el acceso como el aprovechamiento efectivo de la conectividad.

Desde una perspectiva socioeconómica, la disponibilidad de recursos financieros constituye uno de los predictores más consistentes del acceso a conectividad de mayor calidad. Los hogares de menores ingresos enfrentan restricciones directas para costear servicios, dispositivos y mantención tecnológica, lo que limita su inserción en la economía digital incluso cuando existe cobertura disponible. A ello se suma el efecto de la escolaridad y de las habilidades digitales, ya que menores niveles educativos suelen traducirse en mayores barreras para la apropiación tecnológica, restringiendo el acceso a información, trámites, oportunidades de empleo y servicios públicos.

La dimensión territorial profundiza aún más esta desigualdad. Como se aprecia en la Figura 2 la diferencia entre hogares urbanos y rurales en América Latina no constituye una anomalía coyuntural,

sino una brecha persistente, asociada a menor densidad, mayores costos de despliegue y menores incentivos de mercado para la expansión de infraestructura. En este sentido, la ruralidad no solo actúa como un descriptor geográfico, sino como una condición estructural que condiciona las probabilidades de acceso y calidad de la conectividad.

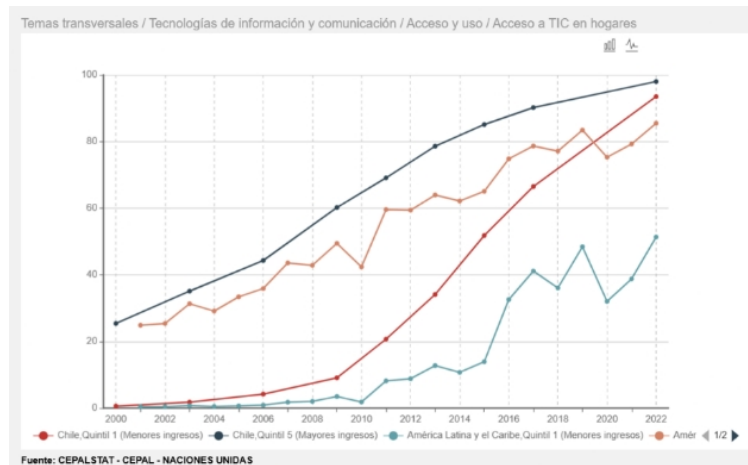


Figura 2: Comparación del acceso a Internet entre hogares urbanos y rurales en América Latina (2022).

Fuente: CEPAL (2021).

En el plano demográfico, la edad y el género también adquieren relevancia. Las personas mayores suelen enfrentar mayores dificultades de incorporación tecnológica, tanto por trayectorias de socialización distintas como por barreras de alfabetización digital. A su vez, en contextos rurales o socialmente rezagados, la brecha de género mantiene expresiones significativas, afectando de manera desproporcionada la autonomía digital de las mujeres y su acceso a herramientas de información, comunicación y empoderamiento. Todo ello permite entender que la brecha digital funciona como un multiplicador de desigualdades preexistentes y no solo como una carencia aislada de infraestructura.

En consecuencia, el estudio de la brecha digital requiere una aproximación que considere simultáneamente la disponibilidad de conexión y las condiciones estructurales que permiten o impiden su aprovechamiento. Esta idea es central para la presente investigación, ya que justifica la incorporación posterior de variables socioeconómicas y territoriales en el modelamiento, bajo el supuesto de que el acceso a conectividad fija responde a un entramado de restricciones que excede la dimensión puramente técnica.

3.2.3. Del acceso desigual a los desiertos digitales

Cuando las desigualdades de acceso, calidad y apropiación se acumulan territorialmente, la brecha digital adquiere una expresión más extrema: la existencia de espacios persistentemente rezagados o virtualmente desconectados del ecosistema digital. Es en este punto donde emerge la noción de **desiertos digitales**, entendidos como territorios en los que la ausencia o precariedad de infraestructura, sumada a restricciones socioeconómicas y geográficas, impide alcanzar un umbral mínimo de integración digital.

Este concepto resulta especialmente pertinente para el caso chileno, cuya geografía extensa, fragmentada y heterogénea introduce desafíos relevantes para el despliegue de redes y para la provisión equitativa de servicios de telecomunicaciones. En comunas rurales, extremas o de baja densidad, el problema no se manifiesta únicamente como menor cobertura, sino también como menor calidad del servicio, menor competencia entre operadores y mayores costos relativos de acceso. Así, la desigualdad digital no solo separa a territorios más conectados de otros menos conectados, sino que puede consolidar verdaderas áreas de rezago persistente, donde las oportunidades de desarrollo quedan condicionadas por la debilidad estructural de la infraestructura digital.

La evidencia disponible para Chile sugiere que esta desconexión no se distribuye homogéneamente en el territorio. Como muestra la Figura 3, la población desconectada se concentra con distinta intensidad entre regiones, lo que refuerza la idea de que la exclusión digital posee una expresión territorial identificable y no puede explicarse únicamente desde indicadores nacionales promedios. Esta concentración espacial del rezago anticipa una idea fundamental para la tesis: el problema no es solo cuántos hogares están conectados, sino también *dónde* se concentran los territorios más rezagados y bajo qué condiciones estructurales persiste esa desconexión.

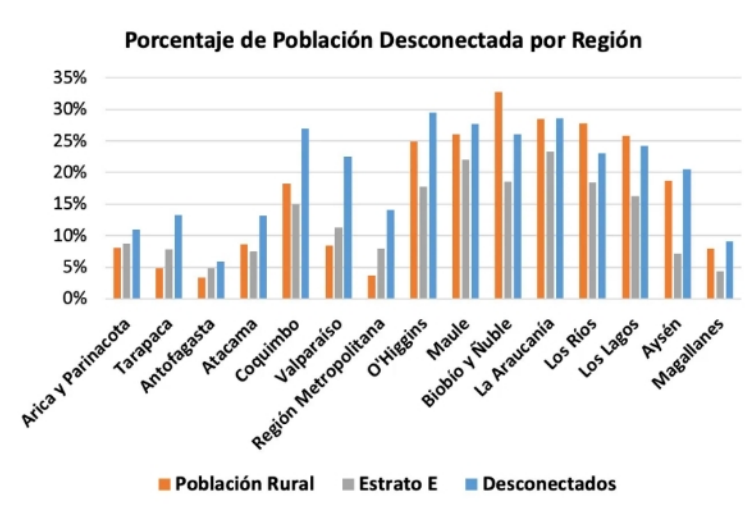


Figura 3: Distribución de la población desconectada por región en Chile (2020).

Fuente: Baeza-Yates (2020).

En síntesis, este primer pilar permite establecer que la conectividad digital no puede analizarse únicamente como un problema técnico de acceso. Se trata de un fenómeno multidimensional y estructural, donde la desigualdad social, la localización territorial y la disponibilidad de infraestructura interactúan produciendo distintas intensidades de exclusión. Esta constatación abre paso al segundo pilar del marco de referencia, en el que se examina por qué la dimensión territorial del problema exige herramientas de análisis espacial capaces de capturar dependencia geográfica, concentración de rezagos y heterogeneidad en la manifestación de la brecha digital.

3.3. Territorio, dependencia espacial y modelación de la brecha digital

3.3.1. La dimensión geoespacial de la brecha digital

Una vez establecida la conectividad digital como un fenómeno de exclusión estructural, resulta necesario reconocer que dicha exclusión no se distribuye de manera uniforme en el territorio. La brecha digital posee una dimensión geoespacial propia, en la medida en que las condiciones de acceso, calidad y uso de Internet se encuentran territorialmente diferenciadas y responden a configuraciones espaciales que no pueden ser comprendidas únicamente a partir de promedios nacionales o regionales. En este sentido, el territorio no constituye un simple soporte físico donde ocurre la desigualdad digital, sino una dimensión activa del problema.

En el caso chileno, esta dimensión espacial adquiere particular relevancia debido a la geografía extensa, fragmentada y heterogénea del país. La fuerte concentración de población e infraestructura en ciertas zonas, la existencia de comunas rurales o extremas, y las diferencias históricas en inversión y conectividad han configurado un escenario en el cual la localización condiciona directamente las oportunidades de acceso e integración digital. Así, la brecha digital no solo expresa diferencias entre individuos o hogares, sino también entre territorios que enfrentan capacidades, restricciones y trayectorias de desarrollo profundamente disímiles.

Desde esta perspectiva, hablar de brecha digital territorial implica reconocer que el rezago tecnológico no es un fenómeno aleatorio ni estrictamente individual, sino una manifestación espacial de desigualdades más amplias. Las comunas más rezagadas no solo presentan menores niveles de acceso, sino que tienden a concentrar otras desventajas simultáneas, como mayor ruralidad, menor densidad, mayor vulnerabilidad social y menor atractivo económico para la inversión privada. En consecuencia, la dimensión espacial del problema no puede tratarse como un aspecto secundario, sino como un componente central de su explicación.

3.3.2. Dependencia territorial y efecto vecindad en infraestructura digital

Reconocer que la brecha digital posee una dimensión geográfica no basta por sí solo. También es necesario considerar que los territorios no operan de forma aislada, sino que se encuentran insertos en estructuras de vecindad e interdependencia. En infraestructura digital, esta idea es particularmente relevante, porque la conectividad de una comuna puede verse influida no solo por sus atributos internos, sino también por las condiciones presentes en su entorno inmediato. Dicho de otro modo, el acceso y la calidad de Internet pueden exhibir *dependencia territorial*, en la medida en que las características de una unidad espacial se relacionan con las de sus unidades vecinas.

La literatura reciente en análisis espacial ha mostrado que ignorar este efecto vecindad conduce a diagnósticos incompletos o derechamente sesgados. En el contexto de la brecha digital, esto significa que una comuna no debe interpretarse únicamente por sus niveles de ingreso, ruralidad o pobreza, sino también por su inserción dentro de una red territorial más amplia, donde la proximidad geográfica, la continuidad de infraestructura y las externalidades espaciales influyen en la manifestación del fenómeno. Así, los territorios pueden tender a agruparse en zonas de alto o bajo acceso, generando patrones de concentración espacial que no serían visibles mediante un análisis convencional.

Esta idea de dependencia territorial es especialmente pertinente para el estudio de la conectividad en Chile. La expansión de redes, la presencia de operadores, la continuidad de corredores de

infraestructura y la cercanía a polos urbanos o nodos regionales pueden generar efectos de arrastre o rezago entre comunas próximas. Como resultado, la brecha digital puede organizarse espacialmente en clústeres de ventaja o desventaja, reforzando la necesidad de analizar no solo cuánto acceso existe, sino también cómo se distribuye y agrupa territorialmente.

3.3.3. La regresión espacial como herramienta para analizar desigualdades territoriales

Si la brecha digital presenta una estructura territorial y además existen relaciones de dependencia entre unidades vecinas, entonces las herramientas analíticas utilizadas para estudiarla deben ser capaces de capturar dicha complejidad. En este punto, la estadística espacial y la econometría espacial adquieren relevancia como marcos metodológicos adecuados para superar las limitaciones de los enfoques puramente descriptivos o de las regresiones lineales convencionales.

En términos generales, el análisis espacial permite identificar si la distribución de un fenómeno responde a patrones de concentración, dispersión o asociación local en el territorio. Ello resulta especialmente útil en estudios sobre brecha digital, donde no basta con conocer la magnitud de la desigualdad, sino que también importa detectar si los territorios rezagados se concentran, si forman clústeres persistentes y si su comportamiento está relacionado con el de las comunas vecinas. Sobre esta base, la econometría espacial permite avanzar un paso más allá, incorporando explícitamente la estructura de vecindad en la modelación de relaciones entre variables.

Dentro de este marco, los modelos espaciales globales permiten estimar relaciones promedio para el conjunto del territorio, mientras que los enfoques locales permiten examinar si la intensidad de los efectos cambia según la localización geográfica. Esta distinción es particularmente relevante para la presente investigación, ya que la realidad chilena difícilmente puede explicarse bajo el supuesto de homogeneidad territorial. La incidencia de la ruralidad, la pobreza o la exclusión estructural no necesariamente opera con la misma intensidad en el norte minero, en la zona central metropolitana o en el sur rural y austral. En consecuencia, la regresión espacial no constituye aquí un recurso metodológico accesorio, sino una herramienta necesaria para representar de forma más fiel la heterogeneidad del fenómeno estudiado.

En síntesis, este segundo pilar permite justificar por qué la brecha digital debe analizarse desde una lógica territorial y por qué el uso de técnicas espaciales resulta pertinente para responder la pregunta de investigación. Si el primer pilar mostró que la conectividad digital está atravesada por desigualdades estructurales, el presente pilar demuestra que dichas desigualdades también presentan organización espacial, dependencia geográfica y variación territorial. Esta constatación abre paso al tercer pilar del marco de referencia, orientado a examinar cómo la infraestructura digital, la inclusión tecnológica y la política pública pueden articular respuestas más equitativas y territorialmente focalizadas.

3.4. Infraestructura, inclusión y política pública para la equidad digital

3.4.1. Infraestructura digital y desigualdad en la provisión de conectividad

La infraestructura digital constituye la base material sobre la cual se construye la conectividad de un territorio. Sin redes, cobertura, capacidad de transmisión y condiciones mínimas de servicio, la inclusión digital se vuelve inviable. Sin embargo, la existencia de infraestructura a escala nacional no garantiza por sí misma una provisión equitativa de conectividad. En la práctica, las condiciones

de acceso, calidad y continuidad del servicio suelen distribuirse de manera desigual, reproduciendo brechas que afectan con mayor intensidad a comunas rurales, extremas o de baja densidad.

En el caso chileno, este problema no se expresa únicamente en la ausencia física de redes, sino también en diferencias persistentes en calidad del servicio, velocidad, estabilidad y competencia entre operadores. En consecuencia, la brecha digital ha evolucionado más allá de un problema de acceso básico, transformándose también en un problema de calidad y de acceso desigual a estándares superiores de conectividad. Esto implica que una parte relevante de la población puede estar formalmente conectada, pero no necesariamente integrada en condiciones equivalentes al ecosistema digital contemporáneo.

Desde esta perspectiva, la infraestructura digital debe ser entendida no solo como un activo tecnológico, sino como un componente estratégico del desarrollo territorial. Su distribución desigual no solo limita la conectividad, sino que afecta indirectamente la productividad, la educación, la inserción laboral, el acceso a servicios estatales y la participación ciudadana. Por ello, la forma en que se expande y regula la infraestructura incide directamente en la reproducción o reducción de desigualdades territoriales más amplias.

3.4.2. Inclusión digital y alfabetización tecnológica más allá del acceso

La superación de la brecha digital no depende exclusivamente del despliegue físico de infraestructura. También requiere considerar la inclusión digital como un proceso más amplio, que involucra asequibilidad, habilidades, apropiación tecnológica y capacidad de uso significativo. En otras palabras, no basta con que una persona o comunidad tenga acceso formal a Internet; también es necesario que disponga de los recursos, competencias y condiciones sociales para utilizar dicha conexión de manera efectiva y provechosa.

Esta perspectiva resulta especialmente importante en contextos donde las desigualdades económicas, educativas y demográficas limitan la apropiación de la tecnología. La falta de alfabetización digital, por ejemplo, restringe el acceso a trámites, oportunidades laborales, educación en línea, servicios de salud y herramientas de participación ciudadana. Del mismo modo, la ausencia de habilidades tecnológicas puede transformar una infraestructura potencialmente disponible en una capacidad subutilizada o irrelevante para ciertos grupos sociales. Esto afecta con especial intensidad a adultos mayores, personas con menor escolaridad, hogares vulnerables y comunidades rurales.

En consecuencia, la inclusión digital debe entenderse como una dimensión inseparable de la política de conectividad. Una estrategia centrada exclusivamente en expansión de cobertura corre el riesgo de confundir acceso formal con integración efectiva. Por el contrario, una visión más robusta reconoce que la verdadera equidad digital requiere simultáneamente infraestructura, asequibilidad, competencias y pertinencia social. Esta mirada es especialmente relevante para la presente investigación, ya que permite entender que la brecha digital no solo se explica por variables técnicas, sino también por condiciones estructurales que inciden en el uso y aprovechamiento real de la conectividad.

3.4.3. Justicia espacial y focalización territorial de la intervención pública

Si la conectividad digital constituye una infraestructura habilitante del desarrollo y si su distribución refleja desigualdades estructurales y territoriales, entonces la política pública no puede limitarse a respuestas homogéneas aplicadas de manera indiferenciada sobre el territorio. El problema exige una lógica de intervención capaz de reconocer que los obstáculos para la conectividad no son idénticos entre comunas, y que por lo tanto las estrategias de solución tampoco deberían serlo. Es en este punto donde el concepto de **justicia espacial** adquiere especial relevancia como marco normativo y analítico para pensar la equidad digital.

La justicia espacial supone que la localización geográfica no debe operar como una penalización estructural en el acceso a derechos, oportunidades y servicios esenciales. Aplicada al problema de la conectividad, esta idea implica reconocer que no basta con expandir infraestructura de forma agregada o mejorar promedios nacionales, sino que es necesario identificar los territorios donde la exclusión digital se concentra, comprender las causas específicas de ese rezago y diseñar respuestas focalizadas según sus condiciones particulares. Esto resulta particularmente importante en un país como Chile, donde las diferencias entre territorios metropolitanos, comunas intermedias y zonas rurales o extremas condicionan de manera decisiva la viabilidad y efectividad de las políticas de conectividad.

Desde este enfoque, la política pública en telecomunicaciones debe avanzar desde una lógica predominantemente uniforme hacia una lógica territorialmente diferenciada, donde la focalización no se base únicamente en cobertura agregada, sino también en vulnerabilidad social, aislamiento geográfico y persistencia del rezago digital. En consecuencia, la brecha digital no debe ser abordada solo como un problema sectorial de telecomunicaciones, sino como una cuestión de equidad territorial y de integración social. Esta premisa resulta central para la tesis, porque conecta directamente el diagnóstico de desigualdad digital con la necesidad de contar con herramientas analíticas capaces de identificar patrones espaciales, dependencias territoriales y zonas prioritarias de intervención.

En síntesis, este tercer pilar muestra que la respuesta frente a la brecha digital requiere articular infraestructura, inclusión y política pública bajo un enfoque de equidad territorial. Si el primer pilar permitió comprender la conectividad como un fenómeno de exclusión estructural, y el segundo justificó la necesidad de analizar su organización espacial, este tercer eje permite cerrar el marco de referencia mostrando que el valor práctico del análisis no reside solo en describir la desigualdad, sino en aportar evidencia para intervenciones más pertinentes, focalizadas y consistentes con el principio de justicia espacial.

3.5. Síntesis de la necesidad de investigación

La revisión desarrollada en este capítulo permite sostener que la brecha digital en Chile no puede entenderse como una carencia aislada de acceso a Internet, sino como un fenómeno estructural, multidimensional y territorialmente diferenciado. El primer pilar mostró que la conectividad digital se encuentra atravesada por desigualdades socioeconómicas, demográficas y geográficas que condicionan no solo la disponibilidad de acceso, sino también la calidad, la apropiación y el uso efectivo de las tecnologías. Desde esta perspectiva, la exclusión digital constituye una manifestación específica de desigualdades más amplias, cuya expresión más crítica se observa en la persistencia de territorios rezagados o virtualmente desconectados del ecosistema digital.

El segundo pilar permitió establecer que dicha desigualdad no se distribuye aleatoriamente en el espacio. Por el contrario, la brecha digital presenta una dimensión geoespacial propia, en la que el territorio opera como un factor explicativo central. La existencia de dependencia territorial, efecto vecindad y posibles patrones de concentración espacial vuelve insuficiente cualquier aproximación basada exclusivamente en promedios agregados o en modelos convencionales que omiten la estructura espacial del fenómeno. En consecuencia, la revisión del estado del arte justifica el uso de herramientas de análisis espacial y econometría espacial como una vía pertinente para modelar la desigualdad digital de forma más rigurosa y territorialmente consistente.

El tercer pilar, por su parte, mostró que la respuesta frente a esta problemática no puede reducirse a la expansión indiferenciada de infraestructura. La superación de la brecha digital exige articular infraestructura, inclusión digital, alfabetización tecnológica y política pública bajo una lógica de equidad territorial. En este marco, la noción de justicia espacial adquiere relevancia como principio orientador, en la medida en que permite reconocer que la ubicación geográfica no debe transformarse en una penalización estructural para el acceso a oportunidades, servicios y derechos asociados a la sociedad digital contemporánea.

En conjunto, estos tres pilares permiten delimitar con claridad la necesidad de la presente investigación. Por una parte, existe un problema sustantivo: la persistencia de desigualdades digitales profundas entre comunas chilenas. Por otra, existe una brecha analítica: la insuficiencia de diagnósticos que integren de manera explícita la dimensión espacial del fenómeno y permitan distinguir patrones de rezago, dependencia geográfica y heterogeneidad territorial. En consecuencia, esta tesis se justifica como un esfuerzo orientado a cuantificar y modelar la brecha digital comunal mediante herramientas espaciales, con el fin de aportar evidencia empírica útil para una comprensión más precisa del problema y para una focalización más pertinente de las políticas públicas de conectividad.

Sobre esta base, el capítulo siguiente presenta la metodología de investigación, detallando el proceso de construcción y validación de la base espacial, la estrategia de análisis exploratorio de datos espaciales y la estimación de modelos econométricos globales y locales para el estudio de la brecha digital en Chile.

4. Metodología

La presente investigación adopta una metodología cuantitativa de carácter aplicado, orientada al análisis espacial de la brecha digital a nivel comunal en Chile. El diseño metodológico combina herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis exploratorio de datos espaciales (AEDE) y econometría espacial, con el propósito de identificar patrones territoriales de conectividad y estimar la asociación entre la penetración de banda ancha fija y un conjunto de variables territoriales y socioeconómicas.

El estudio se desarrolla mediante una secuencia analítica progresiva. En primer lugar, se construye y depura una base comunal integrada a partir de fuentes secundarias oficiales. En segundo término, se caracteriza la distribución territorial del fenómeno mediante estadística descriptiva, cartografía temática y técnicas de autocorrelación espacial global y local. Finalmente, sobre la base de dicha evidencia, se estiman modelos econométricos espaciales globales y locales, con el fin de capturar tanto la dependencia espacial promedio como la heterogeneidad geográfica en la intensidad de los efectos explicativos.

4.1. Diseño metodológico general

La lógica del análisis parte del supuesto de que la brecha digital no se distribuye aleatoriamente en el territorio. Por el contrario, se presume que existen estructuras espaciales persistentes y relaciones estadísticamente significativas entre conectividad, ruralidad y condiciones socioeconómicas, las cuales no pueden ser captadas adecuadamente mediante una aproximación puramente descriptiva o a través de un modelo lineal convencional sin estructura espacial.

En consecuencia, la estrategia metodológica combina dos niveles de análisis complementarios. Por una parte, se estiman modelos espaciales globales, que permiten identificar relaciones promedio para el conjunto del territorio nacional y determinar si la dependencia espacial se manifiesta en la variable dependiente o en el término de error. Por otra, se incorpora un modelo local de regresión geográficamente ponderada (GWR), orientado a examinar si la magnitud y dirección de los coeficientes asociados a ruralidad y pobreza varían entre comunas según su localización.

Con el fin de sintetizar la secuencia analítica del estudio, la Figura 4 presenta el esquema metodológico general de la investigación. En ella se resume el tránsito desde la construcción y validación de la base comunal hasta la estimación de modelos espaciales globales y locales, culminando en la discusión integrada de resultados y sus implicancias para la política pública.

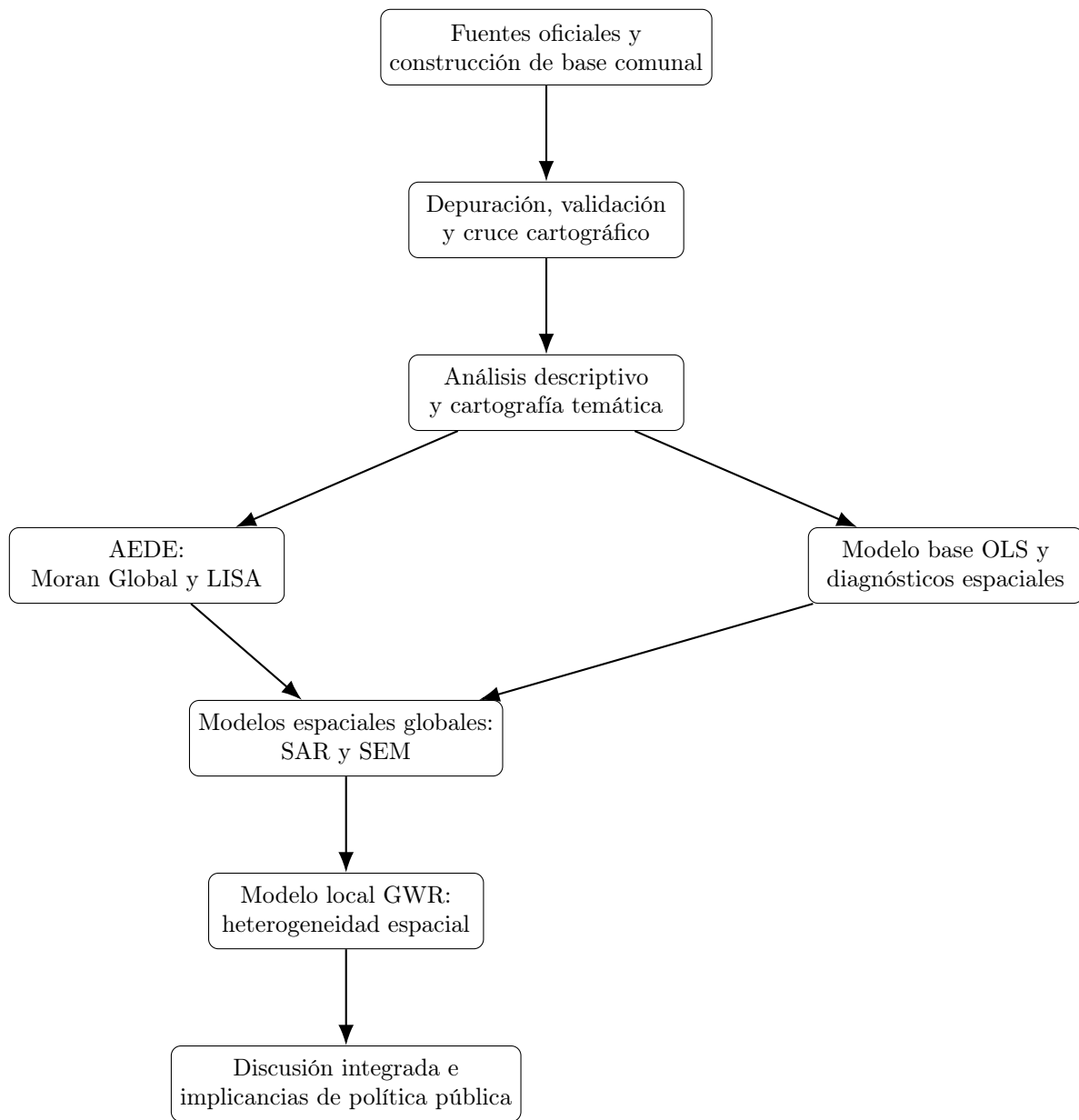


Figura 4: Esquema metodológico de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Construcción de la base y variables de análisis

La unidad de análisis corresponde a la comuna, por constituir el nivel territorial mínimo en que es posible integrar de manera consistente la información estadística oficial sobre conectividad, condiciones socioeconómicas y cartografía administrativa. La base de datos se construye a partir de fuentes secundarias oficiales correspondientes al año 2024, integrando información proveniente de la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y de la Encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN).

La variable dependiente del estudio corresponde a la penetración comunal de banda ancha fija, empleada como proxy del acceso territorial a conectividad fija. Como variables explicativas se incorporan el porcentaje de población rural, la pobreza por ingresos y la pobreza multidimensional. Estas variables fueron seleccionadas por su relevancia teórica en la literatura sobre brecha digital y por su disponibilidad homogénea a escala comunal.

Si bien el marco de referencia reconoce la relevancia de factores demográficos como la edad y el género en la comprensión general de la brecha digital, estas variables no fueron incorporadas directamente en la especificación econométrica final debido a criterios de disponibilidad, consistencia territorial y pertinencia respecto de la unidad de análisis utilizada. Dado que el estudio trabaja a escala comunal y se basa en fuentes secundarias oficiales correspondientes al período de análisis, se priorizaron variables observables de manera homogénea y comparables para el conjunto de comunas consideradas. En este sentido, la ruralidad, la pobreza por ingresos y la pobreza multidimensional permiten representar tres dimensiones centrales del fenómeno: las restricciones territoriales asociadas al despliegue de infraestructura, las limitaciones económicas directas de los hogares y las condiciones estructurales de vulnerabilidad social. La exclusión de variables como edad o género no implica desconocer su importancia teórica, sino delimitar el modelo a variables disponibles, consistentes y pertinentes para una aproximación comunal y espacial de la brecha digital.

La construcción de la base espacial requirió la homologación de identificadores territoriales, la limpieza de formatos, la vinculación entre la matriz estadística y el shapefile comunal, y una depuración final de observaciones con inconsistencias o datos faltantes. Este proceso permitió consolidar una base georreferenciada consistente para el análisis posterior.

4.3. Estrategia de análisis espacial y econométrico

Una vez consolidada la base espacial, se desarrolló un análisis exploratorio de datos espaciales con el fin de evaluar la distribución territorial de la conectividad comunal y determinar la existencia de dependencia espacial. Para ello, se utilizaron estadísticos descriptivos, mapas coropléticos, el Índice de Moran Global y los Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). La estructura de vecindad se formalizó mediante una matriz de pesos espaciales construida con el criterio de k vecinos más cercanos y estandarización por filas, decisión metodológica coherente con la configuración longitudinal y heterogénea del territorio chileno.

Posteriormente, la modelación econométrica se inició con un modelo lineal por mínimos cuadrados ordinarios (OLS), empleado como referencia inicial para evaluar la relación entre la variable dependiente y las variables explicativas. Sobre este modelo se aplicaron diagnósticos de multicolinealidad, heterocedasticidad y dependencia espacial en los residuos, con el objetivo de justificar la transición hacia especificaciones espaciales más apropiadas.

A partir de dichos diagnósticos, se estimaron dos modelos globales alternativos. El primero corresponde al modelo autorregresivo espacial (SAR), apropiado cuando la variable dependiente en una comuna depende directamente del comportamiento observado en comunas vecinas. El segundo corresponde al modelo de error espacial (SEM), pertinente cuando la dependencia espacial se concentra en factores omitidos o perturbaciones no observadas con estructura territorial. Finalmente, se estimó un modelo de regresión geográficamente ponderada (GWR), con el fin de examinar si los efectos asociados a ruralidad y pobreza presentan estabilidad territorial o, por el contrario, muestran

heterogeneidad geográfica.

4.4. Criterios de evaluación y limitaciones

La evaluación empírica de los modelos se realizó a partir de criterios estadísticos y sustantivos. Entre los primeros se consideraron medidas de ajuste, log-verosimilitud, criterios de información, significancia de coeficientes y parámetros espaciales, así como evidencia de dependencia espacial residual. Desde una perspectiva sustantiva, se privilegió la coherencia entre signos estimados, fundamentación teórica e interpretabilidad territorial de los resultados.

No obstante, la metodología aplicada presenta limitaciones propias del uso de datos secundarios y de la escala comunal de observación. En particular, la agregación territorial impide captar heterogeneidades intra-comunales, lo que introduce una restricción asociada al problema de la unidad de área modificable (MAUP). Asimismo, los coeficientes estimados deben interpretarse como evidencia de asociación estadística y territorial, no como prueba causal concluyente. En consecuencia, los resultados del estudio deben ser entendidos como una aproximación aplicada orientada a mejorar la comprensión espacial de la brecha digital y a fortalecer la focalización territorial de políticas públicas de conectividad.

5. Desarrollo, análisis y resultados

En este capítulo se desarrolla la aplicación empírica de la metodología propuesta para analizar la brecha digital en Chile desde una perspectiva territorial. En primer lugar, se presenta el proceso de construcción, depuración y validación de la base de análisis espacial, etapa fundamental para asegurar consistencia entre la información estadística y la cartografía comunal utilizada en el estudio. Posteriormente, se examina la distribución descriptiva del fenómeno mediante estadística básica y cartografía temática, para luego evaluar la existencia de dependencia espacial global y local a través de técnicas de análisis exploratorio de datos espaciales.

Sobre esta base, se formula y estima una estrategia econométrica secuencial. En una primera instancia, se utiliza un modelo lineal clásico como referencia inicial y se aplican diagnósticos espaciales sobre sus residuos. A continuación, se estiman modelos globales de tipo SAR y SEM, con el propósito de capturar la dependencia espacial estructural presente en la variable dependiente o en el término de error. Finalmente, se implementa un modelo de regresión geográficamente ponderada (GWR), que permite identificar heterogeneidad espacial en la intensidad de los efectos estimados. En conjunto, este recorrido metodológico permite pasar desde una caracterización descriptiva del fenómeno hacia una interpretación territorial más robusta y útil para la focalización de políticas públicas de conectividad.

5.1. Construcción, depuración y validación de la base de análisis espacial

La preparación de la base de análisis espacial constituyó una etapa metodológica fundamental del estudio, ya que la validez de los resultados posteriores depende directamente de la consistencia entre la información estadística y la representación cartográfica del territorio. En investigaciones de escala comunal, esta fase no puede entenderse como una tarea meramente operativa, puesto que de ella depende la correcta identificación de las unidades territoriales, la coherencia del cruce entre fuentes, la confiabilidad de la matriz de pesos espaciales y, en última instancia, la interpretabilidad de los resultados econométricos.

La base se construyó mediante la integración de información secundaria oficial correspondiente al año 2024, proveniente de SUBTEL, INE y CASEN. A partir de estas fuentes se conformó una matriz comunal orientada al análisis de la brecha digital en Chile. La variable dependiente se definió como la penetración de banda ancha fija a nivel comunal, utilizada como proxy del acceso territorial a conectividad fija. Esta elección responde a que la conectividad fija representa una dimensión más estructural y estable del acceso digital, particularmente relevante en un estudio orientado a detectar desigualdades territoriales persistentes. Como variables explicativas se incorporaron el porcentaje de población rural, la pobreza por ingresos y la pobreza multidimensional, por tratarse de factores que la literatura identifica de manera sistemática como determinantes relevantes de la exclusión digital.

Tabla 1: Variables utilizadas en el análisis espacial

Variable	Definición operacional	Fuente	Signo esperado
Penetración de banda ancha fija	Indicador comunal de acceso a conectividad fija utilizado como variable dependiente del estudio.	SUBTEL	–
Porcentaje de población rural	Proporción de población residente en áreas rurales dentro de cada comuna.	INE	Negativo
Pobreza por ingresos	Porcentaje de población comunal en situación de pobreza por ingresos.	CASEN	Negativo
Pobreza multidimensional	Porcentaje de población comunal en situación de pobreza multidimensional.	CASEN	Negativo

Fuente: Elaboración propia a partir de SUBTEL, INE y CASEN.

Una vez definida la matriz estadística, fue necesario homologar los identificadores territoriales con el fin de asegurar compatibilidad entre las distintas fuentes utilizadas. Para ello, se estandarizaron los códigos comunales y se revisó la consistencia de formatos, evitando discrepancias derivadas de diferencias nominales, pérdida de ceros a la izquierda o incompatibilidades entre registros administrativos y cartográficos. Esta etapa fue especialmente importante porque, en análisis espaciales, un error en la identificación territorial no solo afecta una observación aislada, sino que puede distorsionar la representación del fenómeno en el mapa, alterar la estructura de vecindad y comprometer el análisis espacial posterior.

Posteriormente, se efectuó el cruce entre la matriz estadística y la cartografía comunal oficial, asociando a cada polígono territorial sus respectivos atributos de conectividad, ruralidad y pobreza. Este procedimiento permitió construir una base georreferenciada apta para la elaboración de cartografía temática, el cálculo de indicadores de autocorrelación espacial y la estimación de modelos econométricos con estructura territorial explícita. Sin embargo, la vinculación entre ambas fuentes no se asumió automáticamente como correcta, sino que fue sometida a una validación específica para verificar cobertura, coincidencia territorial y presencia de casos especiales.

Tabla 2: Validación del cruce entre base estadística y cartografía comunal

Indicador	Valor
Comunas en base estadística	346
Comunas en cartografía	346
Comunas cruzadas exitosamente	345
Comuna excluida del cruce	Antártica (12202)

Fuente: Elaboración propia a partir de la integración entre la base estadística comunal y la cartografía administrativa utilizada en el estudio.

Como resultado de esta validación, se identificaron observaciones que requerían tratamiento metodológico particular, ya fuera por ausencia de correspondencia cartográfica o por presencia de datos faltantes en variables relevantes para la modelación. En consecuencia, se realizó una depuración final de la base, excluyendo aquellas comunas que no cumplieran simultáneamente con los requisitos de integridad estadística y consistencia espacial. Este procedimiento no debe interpretarse como una omisión arbitraria, sino como una decisión orientada a resguardar la robustez del análisis, evitando que observaciones incompletas o territorialmente inconsistentes introduzcan ruido en los estadísticos espaciales y en las estimaciones econométricas.

En este sentido, la muestra efectiva utilizada en el estudio no corresponde únicamente a un universo teórico de comunas definido ex ante, sino al conjunto de territorios para los cuales fue posible garantizar coincidencia entre información estadística, cartografía comunal y completitud de las variables de análisis. Esto implica reconocer que la base final es el resultado de un proceso de intersección empírica entre fuentes oficiales, y no simplemente una descarga directa de datos administrativos sin tratamiento previo. Tal consideración es particularmente importante en un estudio espacial, donde la consistencia entre atributos y geometrías constituye una condición técnica indispensable para cualquier inferencia posterior.

En síntesis, la construcción de la base espacial comprendió la integración de fuentes oficiales, la homologación de identificadores territoriales, la vinculación con cartografía administrativa y la depuración de observaciones inconsistentes o incompletas. Como resultado, se obtuvo una base georreferenciada homogénea y metodológicamente validada, adecuada para el análisis exploratorio de datos espaciales y para la estimación de modelos globales y locales. Sobre esta base depurada se desarrolla, en el siguiente apartado, la caracterización descriptiva y territorial de la brecha digital comunal en Chile.

5.2. Caracterización descriptiva y distribución territorial de la brecha digital

Una vez consolidada y validada la base espacial, el siguiente paso consistió en caracterizar de manera descriptiva la variable dependiente y los principales factores explicativos incorporados en la modelación. Esta etapa cumple una función analítica fundamental, ya que permite dimensionar la magnitud de la heterogeneidad comunal antes de aplicar pruebas formales de dependencia espacial. En otras palabras, no se trata únicamente de presentar estadísticas resumen, sino de establecer una primera lectura empírica del fenómeno y de observar si la distribución territorial de la conectividad fija exhibe contrastes suficientemente marcados como para justificar un análisis espacial más profundo.

La Tabla 3 resume los principales estadísticos descriptivos de las variables consideradas en el estudio. La base final quedó compuesta por 345 comunas, cifra que refleja la muestra efectiva utilizada en el análisis luego del proceso de validación y depuración espacial. En el caso de la variable dependiente, la penetración de banda ancha fija presenta una media de 0.1661 y una desviación estándar de 0.0875, con valores que oscilan entre un mínimo de 0.0140 y un máximo de 0.5050. Esta amplitud revela, desde una primera aproximación, una marcada dispersión territorial en el acceso a conectividad fija, lo que sugiere la coexistencia de comunas con niveles relativamente consolidados de acceso junto a otras donde la cobertura continúa siendo muy limitada.

En cuanto a las variables explicativas, el porcentaje de población rural alcanza una media de 0.3613 y una desviación estándar de 0.2883, siendo la variable con mayor dispersión relativa del conjunto. Este resultado es consistente con la fuerte heterogeneidad territorial de Chile, donde conviven comunas altamente urbanizadas con otras de carácter predominantemente rural. Por su parte, la pobreza por ingresos presenta una media de 0.0903 y la pobreza multidimensional una media de 0.1945, ambas con rangos suficientemente amplios como para anticipar diferencias sustantivas en las condiciones sociales que acompañan la disponibilidad de conectividad fija. En conjunto, estas cifras sugieren que la brecha digital comunal no puede entenderse como un fenómeno aislado de su contexto territorial y socioeconómico, sino como una manifestación asociada a desigualdades preexistentes que se expresan de forma diferenciada en el espacio.

Tabla 3: Estadísticas descriptivas de las variables de estudio

Variable	N	Media	Desv. Est.	Mínimo	Máximo
Penetración BAF	345	0.1661	0.0875	0.0140	0.5050
Pct. rural	345	0.3613	0.2883	0.0000	1.0000
Pobreza por ingresos	345	0.0903	0.0435	0.0087	0.2428
Pobreza multidimensional	345	0.1945	0.0709	0.0011	0.5864

Fuente: Elaboración propia a partir de la base comunal consolidada para el análisis espacial.

La lectura descriptiva adquiere mayor profundidad cuando se observa la distribución espacial de la penetración de banda ancha fija en la cartografía comunal. Como se aprecia en la Figura 5 el patrón territorial del acceso no se presenta de forma uniforme a lo largo del país. Por el contrario, el mapa sugiere una configuración espacial desigual, donde las comunas con mayores niveles de penetración tienden a concentrarse en ciertos núcleos urbanos, periurbanos o altamente integrados, mientras que amplias áreas del territorio exhiben valores comparativamente bajos. Esta constatación visual es relevante, porque permite advertir preliminarmente que la brecha digital no opera como un fenómeno aleatorio ni puramente local, sino que parece organizarse territorialmente en torno a ejes de concentración y rezago.

Los extremos observados en la distribución refuerzan esta lectura. Entre las comunas con mayor penetración de banda ancha fija destacan Algarrobo (0.5050), El Tabo (0.4330), El Quisco (0.4112), Concón (0.3888), Providencia (0.3837) y Ñuñoa (0.3826), a las que se suman Puchuncaví (0.3800), Santo Domingo (0.3699), Sierra Gorda (0.3643) y Zapallar (0.3583). En contraste, los niveles más bajos se registran en Sagrada Familia (0.0140), Quilleco (0.0151), Camiña (0.0219), San Juan de la Costa (0.0225), Río Hurtado (0.0277), Lonquimay (0.0278), Ñiquén (0.0284), Paiguano (0.0297), Petorca (0.0300) y Alto del Carmen (0.0315). La distancia entre ambos grupos no solo es estadísticamente amplia, sino también territorialmente expresiva, ya que revela que la conectividad fija comunal en Chile puede variar en más de treinta veces entre los casos más rezagados y los mejor posicionados.

Desde una perspectiva sustantiva, esta configuración es coherente con el marco teórico desarrollado en los capítulos anteriores. Las comunas más rezagadas tienden a asociarse, en términos generales, con territorios de menor densidad, mayor ruralidad o mayores restricciones estructurales para el despliegue de infraestructura, mientras que buena parte de los niveles más altos se observan en comunas con mayor integración urbana, mejores condiciones socioeconómicas relativas o inser-

ción funcional más favorable dentro de redes metropolitanas y costeras. Si bien esta sección no busca todavía establecer relaciones causales ni cuantificar dependencia espacial, sí permite advertir que la desigualdad digital posee una expresión territorial clara y que, por lo tanto, su estudio requiere herramientas capaces de incorporar explícitamente la dimensión espacial del fenómeno.

Penetración de banda ancha fija por comuna en Chile

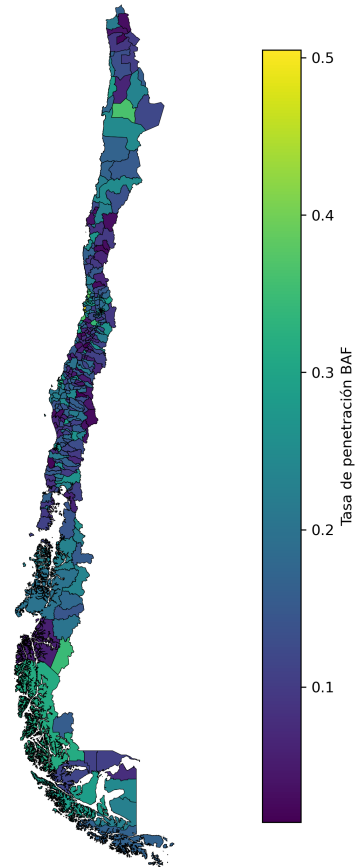


Figura 5: Distribución espacial de la penetración de banda ancha fija por comuna en Chile.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

A partir de lo anterior, esta etapa descriptiva cumple un doble propósito. Por una parte, confirma que la base de datos presenta variabilidad suficiente para sustentar el análisis econométrico posterior. Por otra, entrega una primera señal de que la distribución de la conectividad fija podría responder a patrones espaciales persistentes, más que a simples diferencias comunales aisladas. En consecuencia, la caracterización descriptiva y cartográfica desarrollada en esta sección no constituye un ejercicio accesorio, sino el punto de partida empírico para el análisis de dependencia espacial que se presenta en el apartado siguiente.

5.3. Dependencia espacial del fenómeno

La evidencia descriptiva presentada en el apartado anterior permitió advertir que la penetración comunal de banda ancha fija no se distribuye homogéneamente en el territorio chileno. Sin embargo, la observación cartográfica por sí sola no basta para sostener que dicha distribución responde a una estructura espacial estadísticamente significativa. Por ello, en esta sección se evalúa formalmente la presencia de dependencia espacial mediante herramientas de análisis exploratorio de datos espaciales, con el propósito de determinar si las comunas con alta o baja conectividad tienden a agruparse territorialmente y si dicho patrón justifica la utilización posterior de modelos econométricos espaciales.

En términos metodológicos, este paso resulta crucial, ya que la detección de autocorrelación espacial permite establecer si la brecha digital comunal debe interpretarse como un fenómeno geográficamente organizado y no como una mera suma de diferencias locales independientes. Sobre esta base, el análisis se estructura en tres momentos: primero, la especificación de la matriz de pesos espaciales que formaliza la estructura de vecindad entre comunas; segundo, la estimación del Índice de Moran Global, que permite evaluar la existencia de dependencia espacial promedio; y tercero, la identificación de agrupamientos locales mediante Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA), los cuales permiten reconocer clústeres territoriales específicos de alta y baja conectividad.

5.3.1. Especificación de la matriz de pesos espaciales

La evaluación de dependencia espacial requiere, en primer lugar, definir formalmente la estructura de vecindad entre las unidades territoriales analizadas. Para ello, se construyó una matriz de pesos espaciales W utilizando el criterio de k vecinos más cercanos, con $k = 4$ y estandarización por filas. Esta decisión responde a la necesidad de representar relaciones de proximidad entre comunas en un contexto geográfico como el chileno, caracterizado por una configuración longitudinal, alta heterogeneidad territorial y presencia de comunas extremas o fragmentadas, donde los criterios de contigüidad física estricta resultan menos adecuados.

La matriz fue construida sobre la cartografía comunal proyectada en un sistema de coordenadas métricas, de modo que la proximidad espacial pudiera calcularse de forma consistente. Bajo esta especificación, cada comuna queda vinculada a sus cuatro vecinas más próximas, garantizando que todas las observaciones participen de una estructura espacial homogénea y evitando la presencia de unidades aisladas dentro del análisis. La estandarización por filas, por su parte, permite interpretar los rezagos espaciales como promedios ponderados del entorno inmediato, facilitando la comparación entre territorios.

Desde una perspectiva sustantiva, esta elección metodológica supone que la conectividad comunal puede verse influida por dinámicas presentes en el entorno más cercano, ya sea por continuidad de infraestructura, proximidad a nodos urbanos, externalidades territoriales o similitudes estructurales entre comunas vecinas. En consecuencia, la matriz W no constituye un elemento meramente técnico, sino la formalización empírica del supuesto de interdependencia espacial que sustenta el análisis posterior.

5.3.2. Autocorrelación espacial global: Índice de Moran

Una vez definida la estructura de vecindad, se estimó el Índice de Moran Global para evaluar si la distribución espacial de la penetración de banda ancha fija difiere significativamente de un patrón

aleatorio. El resultado obtenido fue un valor de $I = 0.4346$, con un p -valor de 0.001 y un estadístico $z = 12.3837$, lo que permite rechazar con holgura la hipótesis nula de aleatoriedad espacial. En términos sustantivos, este resultado indica la presencia de autocorrelación espacial positiva global, es decir, una tendencia a que comunas con niveles similares de conectividad fija se localicen próximas entre sí.

La magnitud del estadístico es relevante, ya que no solo confirma dependencia espacial, sino que sugiere una organización territorial nítida del fenómeno. En otras palabras, la conectividad fija comunal en Chile no se comporta como una variable distribuida al azar en el espacio, sino que presenta una estructura en la cual los niveles altos y bajos de penetración tienden a concentrarse territorialmente. Esto refuerza la hipótesis central de la tesis, según la cual la brecha digital posee una manifestación espacial persistente que no puede ser captada adecuadamente mediante enfoques no espaciales.

La Figura 6 complementa esta evidencia mediante el diagrama de dispersión de Moran. En él se observa la relación entre el valor estandarizado de la variable y el promedio espacial de sus vecinas, mostrando una pendiente positiva coherente con la autocorrelación detectada. Si bien el gráfico cumple una función principalmente ilustrativa, resulta útil para visualizar que la asociación espacial identificada por el estadístico global no es una abstracción matemática, sino una propiedad observable de la distribución territorial de la conectividad.

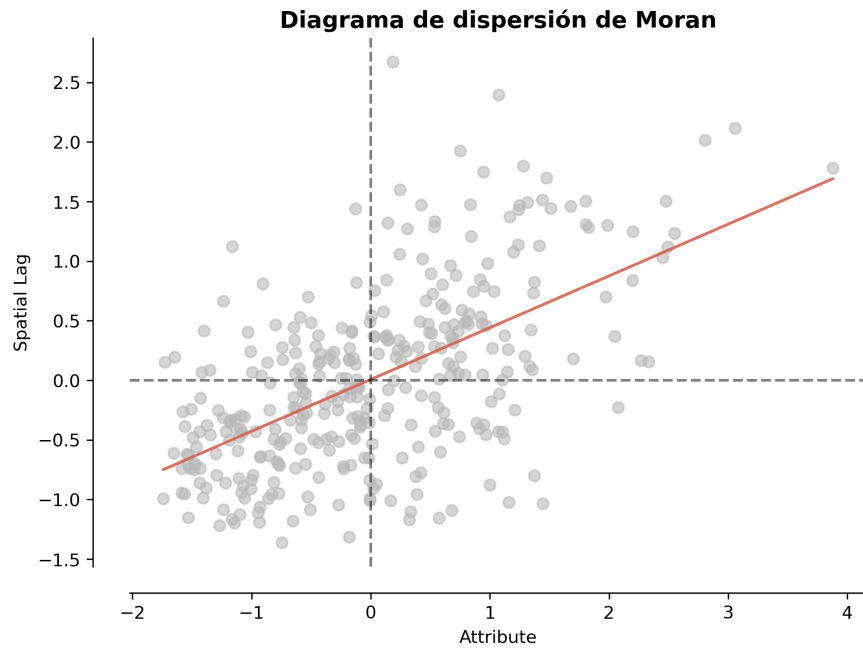


Figura 6: Diagrama de dispersión de Moran para la penetración de banda ancha fija comunal.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

En consecuencia, el Índice de Moran Global no solo valida la existencia de dependencia espacial en la variable de estudio, sino que además proporciona una primera justificación formal para avanzar hacia especificaciones econométricas que incorporen explícitamente dicha estructura espacial. No obstante, este indicador resume el patrón promedio para el conjunto del territorio y, por tanto,

no permite identificar dónde se localizan concretamente los agrupamientos relevantes. Para ello, es necesario complementar el análisis con una medida local de asociación espacial.

5.3.3. Autocorrelación espacial local: clústeres LISA

Con el fin de identificar la localización específica de los patrones de agrupamiento territorial, se estimaron Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA). A diferencia del Índice de Moran Global, que resume la dependencia espacial promedio, los indicadores locales permiten detectar comunas que forman parte de clústeres significativos de alta o baja conectividad, así como observaciones atípicas cuyo comportamiento contrasta con el de su entorno inmediato.

Los resultados muestran que, de las 345 comunas analizadas, 44 integran clústeres *High-High*, 36 clústeres *Low-Low*, 12 corresponden a configuraciones *High-Low*, 2 a configuraciones *Low-High* y 251 no presentan asociación local significativa al nivel considerado. Esta distribución confirma que la dependencia espacial observada globalmente no se reparte de forma homogénea en todo el territorio, sino que se concentra en determinados núcleos de ventaja y rezago, coexistiendo con un número importante de comunas donde la asociación espacial no alcanza significancia estadística.

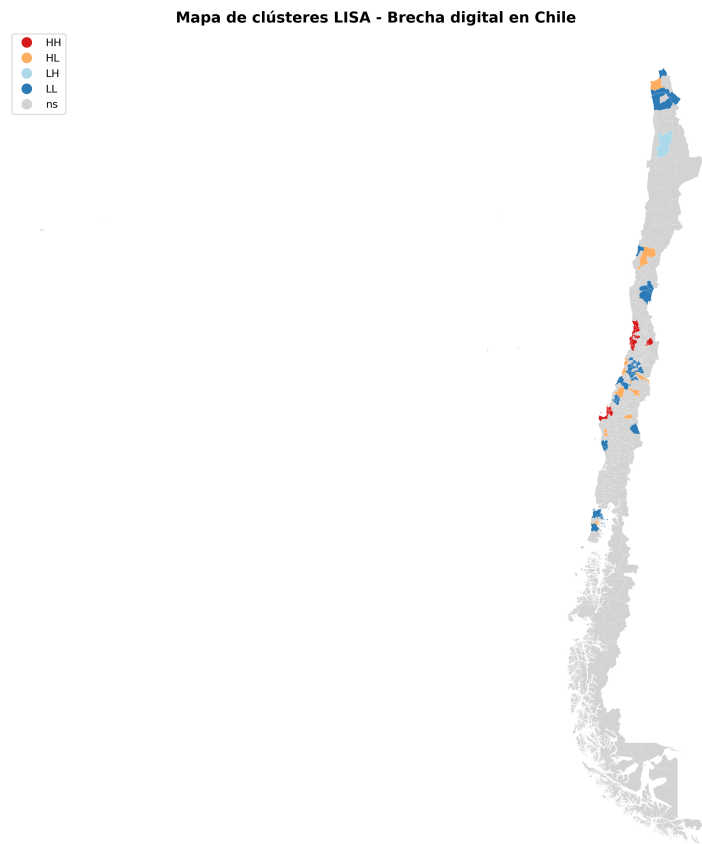


Figura 7: Clústeres LISA de la penetración de banda ancha fija por comuna en Chile.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

Tabla 4: Síntesis de clústeres LISA para la penetración de banda ancha fija

Clúster	Número de comunas
No significativo	251
High-High	44
Low-Low	36
High-Low	12
Low-High	2

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.

Desde una lectura territorial, la presencia de clústeres *High-High* sugiere la existencia de espacios donde la conectividad fija alcanza niveles relativamente altos y se refuerza entre comunas próximas, probablemente asociadas a entornos más urbanizados, integrados o mejor servidos por infraestructura. En contraste, los clústeres *Low-Low* dan cuenta de áreas donde el rezago en conectividad no constituye un hecho aislado, sino una condición territorialmente compartida entre comunas vecinas. Esta distinción es especialmente relevante para la tesis, porque permite pasar desde la identificación general de desigualdad espacial a la localización concreta de territorios prioritarios para el análisis y la intervención pública.

En síntesis, la evidencia local confirma que la brecha digital comunal en Chile no solo presenta dependencia espacial promedio, sino también configuraciones territoriales específicas de concentración y rezago. En conjunto, el Índice de Moran Global y los clústeres LISA validan empíricamente la pertinencia de incorporar la dimensión espacial en la modelación econométrica posterior. Sobre esta base, el apartado siguiente avanza hacia la especificación del modelo econométrico, comenzando por el modelo lineal base, la revisión de multicolinealidad y los diagnósticos que justifican la transición hacia modelos espaciales globales y locales.

5.4. Especificación y diagnóstico del modelo econométrico espacial

Una vez verificada la existencia de dependencia espacial en la distribución comunal de la penetración de banda ancha fija, el siguiente paso consiste en especificar un modelo econométrico base que permita evaluar la relación entre la variable dependiente y los principales factores explicativos considerados en el estudio. Esta etapa cumple una función metodológica central, ya que permite establecer un punto de referencia analítico antes de incorporar estructura espacial explícita en la modelación. En otras palabras, el objetivo no es presentar el modelo lineal clásico como especificación final, sino utilizarlo como base de contraste para determinar en qué medida la brecha digital comunal puede ser explicada por variables territoriales y socioeconómicas, y si los residuos de dicha especificación conservan problemas que justifiquen la transición hacia modelos espaciales.

Sobre esta base, la subsección se organiza en tres momentos. En primer lugar, se presenta la definición del modelo base y de las variables explicativas incorporadas. En segundo término, se evalúa la posible existencia de multicolinealidad entre dichas variables, con el fin de asegurar que los coeficientes estimados sean interpretables y no respondan a redundancias excesivas en la información. Finalmente, se analizan los resultados del modelo OLS junto con pruebas de heterocedasticidad y dependencia espacial residual, con el propósito de determinar si la especificación lineal convencional resulta suficiente o si, por el contrario, es necesario avanzar hacia modelos espaciales globales.

5.4.1. Definición del modelo base y variables explicativas

Como punto de partida, se estimó un modelo lineal por mínimos cuadrados ordinarios (OLS), donde la variable dependiente corresponde a la penetración comunal de banda ancha fija y las variables explicativas representan dimensiones territoriales y socioeconómicas previamente justificadas en el marco de referencia. La especificación general adoptada fue la siguiente:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 R_i + \beta_2 P_i + \beta_3 M_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

donde y_i representa la penetración comunal de banda ancha fija en la comuna i ; R_i corresponde al porcentaje de población rural; P_i a la pobreza por ingresos; M_i a la pobreza multidimensional; β_0 es la constante del modelo; β_1 , β_2 y β_3 son los parámetros a estimar; y ε_i corresponde al término de error.

La inclusión de estas variables responde a un criterio de parsimonia y coherencia con la pregunta de investigación. En conjunto, permiten capturar tres dimensiones mínimas del fenómeno: la dificultad territorial de despliegue de infraestructura, la restricción económica directa de los hogares y la exclusión estructural más amplia asociada a condiciones de vida desfavorables. A nivel teórico, se esperó una relación negativa entre estas variables y la penetración de banda ancha fija, bajo el supuesto de que mayores niveles de ruralidad y pobreza tienden a asociarse con menores niveles de conectividad fija comunal.

5.4.2. Evaluación de multicolinealidad

Antes de interpretar los coeficientes del modelo base, se evaluó la posible existencia de multicolinealidad entre las variables explicativas mediante el Factor de Inflación de la Varianza (VIF). Esta revisión resulta necesaria para asegurar que los coeficientes estimados no se encuentren artificialmente distorsionados por relaciones lineales excesivamente altas entre los predictores, lo que dificultaría tanto su significancia estadística como su interpretación sustantiva.

Los resultados se presentan en la Tabla 5. En términos generales, los VIF obtenidos se mantienen en niveles bajos, con valores de 1.2990 para el porcentaje de población rural, 1.6955 para pobreza por ingresos y 1.4241 para pobreza multidimensional. Incluso considerando la constante, el indicador se mantiene por debajo de umbrales habitualmente asociados a problemas severos de colinealidad. En consecuencia, no se observa evidencia de una redundancia estadística significativa entre las variables explicativas incorporadas en el modelo.

Tabla 5: Evaluación de multicolinealidad del modelo base

Variable	VIF
Constante	9.0882
Pct. rural	1.2990
Pobreza por ingresos	1.6955
Pobreza multidimensional	1.4241

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.

Este resultado refuerza la validez de la especificación adoptada, ya que sugiere que las tres variables explicativas, aun estando conceptualmente relacionadas con desigualdades territoriales y sociales, aportan información diferenciada al modelo. Por lo tanto, los coeficientes estimados en la etapa siguiente pueden interpretarse como asociaciones específicas y no como simples reflejos de una misma dimensión subyacente repetida en distintas formas.

5.4.3. Diagnóstico del modelo OLS y tests de dependencia espacial

La estimación del modelo OLS muestra que dos de las tres variables explicativas presentan asociaciones negativas y estadísticamente significativas con la penetración comunal de banda ancha fija. En particular, el porcentaje de población rural exhibe un coeficiente de -0.1365 ($p < 0.001$) y la pobreza por ingresos un coeficiente de -0.6147 ($p < 0.001$), lo que sugiere que ambas dimensiones se asocian con menores niveles de conectividad fija. La pobreza multidimensional también presenta signo negativo, con un coeficiente de -0.0959 , aunque su significancia estadística no alcanza el umbral convencional del 5 % ($p = 0.0966$). En términos de ajuste, el modelo alcanza un $R^2 = 0.4798$, indicando que cerca del 48 % de la variación observada en la penetración comunal puede ser explicada por el conjunto de variables incorporadas.

Tabla 6: Resultados del modelo OLS base

Variable	Coeficiente	Error estándar	Estadístico t	p -valor
Constante	0.2896	0.0103	28.1600	0.0000
Pct. rural	-0.1365	0.0135	-10.1072	0.0000
Pobreza por ingresos	-0.6147	0.1022	-6.0161	0.0000
Pobreza multidimensional	-0.0959	0.0576	-1.6661	0.0966

$R^2 = 0.4798$; R^2 ajustado = 0.4752.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.

Si bien estos resultados entregan una primera aproximación útil al comportamiento del fenómeno, los diagnósticos posteriores muestran que la especificación lineal convencional resulta insuficiente como modelo final. En primer lugar, la prueba de Breusch–Pagan detecta heterocedasticidad, tanto en su versión LM como en su versión basada en estadístico F , lo que indica que la varianza de los errores no se mantiene constante entre observaciones. En segundo término, el análisis espacial de los residuos revela dependencia residual significativa. El Índice de Moran aplicado a los errores del modelo OLS alcanza un valor de 0.2147 con significancia estadística, mientras que tanto el test LM-lag como el test LM-error resultan significativos, al igual que sus respectivas versiones robustas.

Tabla 7: Diagnósticos del modelo OLS base

Prueba	Estadístico	<i>p</i> -valor
Breusch–Pagan (LM)	14.7061	0.0021
Breusch–Pagan (F)	5.0609	0.0019
Moran de residuos	0.2147	0.0000
LM-lag	36.1720	0.0000
Robust LM-lag	4.5480	0.0330
LM-error	36.4960	0.0000
Robust LM-error	4.8720	0.0273
LM-SARMA	41.0440	0.0000

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.

Estos resultados son metodológicamente relevantes por dos razones. En primer lugar, muestran que el modelo OLS, aun capturando asociaciones sustantivas entre conectividad, ruralidad y pobreza, deja sin explicar una parte de la estructura espacial del fenómeno. En segundo lugar, el hecho de que tanto los diagnósticos asociados al rezago espacial como aquellos vinculados al error espacial resulten significativos sugiere que no es prudente seleccionar anticipadamente una única forma de dependencia sin contrastación adicional. En consecuencia, la evidencia obtenida no solo descarta al modelo lineal clásico como especificación final suficiente, sino que además justifica la estimación comparativa de modelos espaciales globales de tipo SAR y SEM, lo que se desarrolla en el apartado siguiente.

5.5. Estimación y comparación de modelos espaciales globales

Los diagnósticos presentados en el apartado anterior mostraron que el modelo OLS, si bien permite identificar asociaciones sustantivas entre conectividad fija, ruralidad y pobreza, no resulta suficiente como especificación final. La presencia simultánea de heterocedasticidad y dependencia espacial residual sugiere que la brecha digital comunal en Chile no puede ser representada adecuadamente mediante un modelo lineal convencional. En particular, la significancia tanto de los contrastes asociados al rezago espacial como de aquellos vinculados al error espacial indica que el fenómeno podría responder a más de un tipo de estructura de dependencia, por lo que no resulta metodológicamente prudente adoptar una única especificación sin contrastación adicional.

En consecuencia, se estimaron dos modelos espaciales globales alternativos. Por una parte, el modelo autorregresivo espacial (SAR), que incorpora explícitamente la posibilidad de que la conectividad de una comuna dependa del comportamiento observado en sus vecinas. Por otra, el modelo de error espacial (SEM), que asume que la dependencia territorial se manifiesta principalmente a través de factores omitidos o perturbaciones no observadas con estructura espacial. La comparación entre ambas especificaciones permite no solo mejorar el ajuste respecto del modelo OLS, sino también determinar qué forma de dependencia espacial representa mejor el comportamiento agregado del fenómeno.

5.5.1. Resultados del modelo SAR

El modelo SAR fue estimado con el propósito de evaluar si la penetración comunal de banda ancha fija presenta una dinámica de dependencia directa entre unidades vecinas. Los resultados muestran un buen desempeño general de la especificación, con un pseudo $R^2 = 0.5336$, un log-likelihood de 479.6873 y un criterio de información de Akaike de -949.3746 , mejorando de forma clara el ajuste observado en el modelo OLS. Esto sugiere que la incorporación de un término autorregresivo espacial captura una parte relevante de la estructura territorial presente en la variable dependiente.

En términos de coeficientes, el porcentaje de población rural mantiene un efecto negativo y estadísticamente significativo sobre la penetración de banda ancha fija, con un coeficiente de -0.1154 . Del mismo modo, la pobreza por ingresos presenta un efecto negativo de -0.4234 , mientras que la pobreza multidimensional también aparece con signo negativo y significancia estadística, con un coeficiente de -0.1228 . Estos resultados son consistentes con el marco conceptual de la tesis, en la medida en que refuerzan la idea de que la conectividad fija se ve reducida en comunas con mayores restricciones territoriales y socioeconómicas.

Un resultado particularmente relevante del modelo es la significancia del parámetro espacial $\rho = 0.3051$, lo que confirma la existencia de dependencia espacial positiva en la variable dependiente. En términos sustantivos, ello implica que la conectividad observada en una comuna no depende únicamente de sus atributos internos, sino también del comportamiento promedio de las comunas vecinas. Esta lectura resulta coherente con la noción de efecto vecindad desarrollada en el marco de referencia, donde la continuidad de infraestructura, la proximidad a nodos urbanos y las externalidades territoriales pueden generar procesos de arrastre espacial.

Tabla 8: Resultados del modelo SAR

Variable	Coeficiente	Error estándar	Estadístico z	p -valor
Constante	0.2191	0.0161	13.5738	0.0000
Pct. rural	-0.1154	0.0130	-8.8905	0.0000
Pobreza por ingresos	-0.4234	0.1023	-4.1382	0.0000
Pobreza multidimensional	-0.1228	0.0542	-2.2660	0.0235
ρ	0.3051	0.0541	5.6399	0.0000

Pseudo $R^2 = 0.5336$; Log-likelihood = 479.6873; AIC = -949.3746 .

Fuente: *Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.*

Adicionalmente, el modelo SAR permite distinguir entre efectos directos, indirectos y totales. Bajo esta especificación, la ruralidad presenta un efecto total de -0.1661 , la pobreza por ingresos de -0.6092 y la pobreza multidimensional de -0.1768 . Esto significa que la incidencia de estas variables no se agota en la comuna donde se observan, sino que parte de su efecto también se transmite espacialmente a través del sistema de vecindades. Desde esta perspectiva, el SAR ofrece una lectura especialmente útil para comprender la brecha digital como un fenómeno no solo localizado, sino también parcialmente difusivo en el territorio.

5.5.2. Resultados del modelo SEM

El modelo SEM fue estimado bajo el supuesto de que la dependencia espacial no actúa directamente sobre la variable dependiente, sino a través de factores omitidos o perturbaciones no observadas que presentan estructura territorial. Los resultados indican que esta especificación también mejora de manera importante al modelo OLS y, además, supera marginalmente al SAR en términos de ajuste global. En particular, el modelo presenta un pseudo $R^2 = 0.4764$, un log-likelihood de 480.7114 y un AIC de -953.4227 , lo que lo convierte en la mejor especificación global entre los modelos contrastados según este criterio de información.

Los coeficientes estimados mantienen la dirección esperada. El porcentaje de población rural presenta un efecto negativo de -0.1137 , la pobreza por ingresos un efecto de -0.5727 y la pobreza multidimensional un efecto de -0.1483 , todos estadísticamente significativos. A diferencia del OLS, en el modelo SEM las tres variables explicativas resultan significativas al nivel convencional, lo que refuerza la idea de que una parte del problema observado en la especificación lineal base respondía precisamente a la omisión de estructura espacial en los errores.

El parámetro espacial $\lambda = 0.4072$ es positivo y altamente significativo, lo que confirma que existe dependencia espacial en el término de error. En términos sustantivos, este resultado sugiere que la conectividad fija comunal está influida por factores territoriales no observados que no son capturados completamente por las variables incluidas en el modelo, pero que presentan un patrón espacial sistemático. Esta lectura resulta plausible en el caso chileno, donde elementos como calidad de infraestructura no medida directamente, historia de inversión territorial, presencia efectiva de operadores o restricciones geográficas específicas pueden afectar la conectividad comunal sin encontrarse explícitamente representados en la base de datos.

Tabla 9: Resultados del modelo SEM

Variable	Coeficiente	Error estándar	Estadístico z	p -valor
Constante	0.2883	0.0122	23.6702	0.0000
Pct. rural	-0.1137	0.0140	-8.1141	0.0000
Pobreza por ingresos	-0.5727	0.1154	-4.9617	0.0000
Pobreza multidimensional	-0.1483	0.0615	-2.4121	0.0159
λ	0.4072	0.0631	6.4537	0.0000

Pseudo $R^2 = 0.4764$; Log-likelihood = 480.7114; AIC = -953.4227 .

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.

Desde una perspectiva analítica, el SEM sugiere que la brecha digital comunal en Chile no solo responde a atributos observables como ruralidad y pobreza, sino también a una estructura territorial latente que permanece en el error y que debe ser incorporada para evitar inferencias incompletas. En este sentido, el modelo ofrece una interpretación particularmente consistente con la evidencia obtenida en el análisis exploratorio espacial y en los diagnósticos del OLS, donde la dependencia espacial residual ya aparecía de forma significativa.

5.5.3. Comparación entre modelos globales y criterio de selección

La comparación conjunta entre OLS, SAR y SEM permite evaluar en qué medida la incorporación de estructura espacial mejora el ajuste del modelo y qué especificación representa de mejor forma la dependencia observada en la conectividad comunal. Los resultados se sintetizan en la Tabla 10. En términos generales, los dos modelos espaciales superan al OLS, tanto en criterios de información como en log-verosimilitud. Esto confirma que la inclusión explícita de dependencia espacial no constituye un refinamiento accesorio, sino una mejora sustantiva en la representación empírica del fenómeno.

Tabla 10: Comparación entre modelos econométricos globales

Modelo	R^2 / pseudo R^2	AIC	Log-likelihood	Parámetro espacial
OLS	0.4798	-920.4980	464.2490	—
SAR	0.5336	-949.3746	479.6873	$\rho = 0.3051$
SEM	0.4764	-953.4227	480.7114	$\lambda = 0.4072$

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.

La Figura 8 refuerza esta comparación visualmente mediante los valores de AIC. Como se observa, tanto el SAR como el SEM mejoran de forma clara al OLS, mientras que el SEM obtiene el menor valor, lo que sugiere un mejor equilibrio entre ajuste y complejidad del modelo. Aunque el SAR exhibe un pseudo R^2 algo superior, el SEM presenta mejor log-verosimilitud y mejor criterio de información, lo que en esta investigación se considera especialmente relevante para la selección del modelo global preferente.

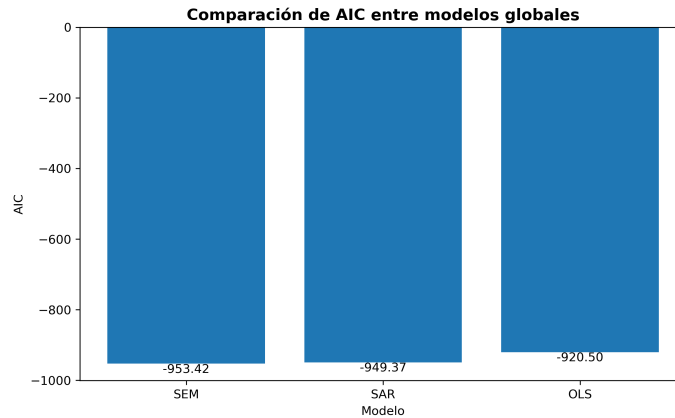


Figura 8: Comparación de AIC entre modelos econométricos globales.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

Desde el punto de vista sustantivo, ambos modelos ofrecen información valiosa. El SAR muestra que existe un componente de interacción espacial directa en la variable dependiente, mientras que el SEM sugiere que buena parte de la dependencia territorial se manifiesta a través de factores omitidos con estructura espacial. Dado que los diagnósticos del modelo base evidenciaron dependencia residual significativa y que el SEM logra el mejor desempeño global según AIC y log-verosimilitud, en esta tesis se adopta al modelo SEM como especificación global preferente. No obstante, el SAR

se conserva como modelo alternativo de contraste, ya que aporta una lectura complementaria sobre los posibles mecanismos de difusión territorial de la conectividad.

La cartografía de residuos estandarizados del modelo SEM, presentada en la Figura 9, permite complementar esta elección desde una perspectiva territorial. Si bien aún pueden existir contrastes residuales puntuales, el patrón espacial remanente no reproduce con la misma nitidez la organización observada en la variable original, lo que sugiere que el modelo absorbe una parte importante de la dependencia territorial presente en los datos. En este sentido, el SEM no solo mejora las métricas globales de ajuste, sino que también ofrece una representación espacial más consistente del fenómeno.

Residuos estandarizados del modelo SEM

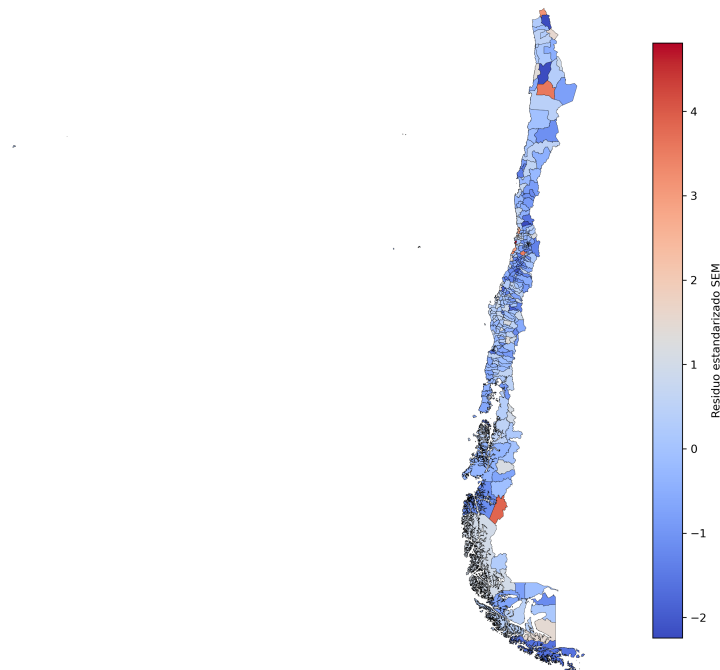


Figura 9: Residuos estandarizados del modelo SEM.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

En síntesis, la comparación entre modelos globales permite concluir que la incorporación explícita de estructura espacial mejora de forma clara la explicación de la brecha digital comunal en Chile. Entre las especificaciones contrastadas, el modelo SEM ofrece el mejor desempeño agregado y se adopta como referente global para la interpretación del fenómeno. Sin embargo, dado que las desigualdades observadas pueden variar en intensidad a lo largo del territorio, la comparación global no agota el problema. Por ello, en el siguiente apartado se incorpora un enfoque local mediante regresión geográficamente ponderada (GWR), con el fin de examinar la heterogeneidad espacial de los coeficientes estimados.

5.6. Heterogeneidad espacial local: modelo GWR

La comparación entre modelos globales mostró que la incorporación de estructura espacial mejora de forma sustantiva la explicación de la brecha digital comunal en Chile, y que el modelo SEM ofrece el mejor desempeño agregado entre las especificaciones contrastadas. Sin embargo, esa conclusión no agota completamente el problema analítico. Tanto el OLS como los modelos espaciales globales parten del supuesto de que la relación entre conectividad fija, ruralidad y pobreza puede resumirse mediante un único conjunto de coeficientes para la totalidad del territorio nacional. En un país geográficamente heterogéneo como Chile, dicho supuesto resulta restrictivo, pues es razonable esperar que los determinantes de la brecha digital no operen con la misma intensidad en comunas metropolitanas, periurbanas, rurales, intermedias o extremas.

Bajo esta premisa, se estimó un modelo de regresión geográficamente ponderada (GWR), cuyo objetivo es capturar heterogeneidad espacial local en los coeficientes. A diferencia de los modelos globales, el GWR estima una ecuación específica para cada comuna, ponderando con mayor intensidad la información proveniente de sus vecinas más próximas. Esto permite examinar si la relación entre la penetración de banda ancha fija y sus factores explicativos varía territorialmente, revelando patrones que quedarían ocultos bajo una especificación promedio. En este sentido, el GWR no reemplaza la lectura entregada por el SEM, sino que la profundiza: mientras el modelo global resume la estructura espacial promedio del fenómeno, el modelo local permite examinar cómo esa estructura cambia de forma concreta entre distintos territorios.

Formalmente, la especificación estimada puede representarse de la siguiente manera:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)R_i + \beta_2(u_i, v_i)P_i + \beta_3(u_i, v_i)M_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

donde y_i representa la penetración comunal de banda ancha fija en la comuna i ; R_i corresponde al porcentaje de población rural; P_i a la pobreza por ingresos; M_i a la pobreza multidimensional; y (u_i, v_i) representa la localización geográfica de la comuna i . De este modo, los coeficientes $\beta_k(u_i, v_i)$ pueden variar espacialmente según el contexto territorial, permitiendo que la relación entre conectividad fija y variables explicativas no quede restringida a un único patrón promedio para todo el país.

Esta formulación permite abandonar el supuesto de homogeneidad espacial implícito en los modelos globales y examinar si la brecha digital comunal responde a configuraciones territoriales diferenciadas. En este sentido, el GWR no reemplaza la lectura entregada por el modelo SEM, sino que la complementa: mientras el modelo global resume la estructura espacial promedio del fenómeno, el modelo local permite identificar cómo la intensidad de los efectos cambia entre comunas y macrozonas del territorio nacional.

5.6.1. Calibración, ajuste y desempeño del modelo

La calibración del modelo se realizó utilizando las coordenadas proyectadas de los centroides comunales y un esquema de ponderación espacial con kernel adaptativo *bisquare*. La selección automática del ancho de banda arrojó un valor óptimo de 75, lo que implica que cada regresión local se estima considerando una ventana adaptativa de 75 observaciones vecinas relevantes. Esta elección resulta metodológicamente apropiada en el caso chileno, porque permite ajustar el radio efectivo de influencia según la densidad territorial de las comunas, evitando imponer una distancia fija en un

país donde las unidades espaciales presentan tamaños, formas y niveles de proximidad muy disímiles.

Los resultados globales del GWR muestran una mejora importante respecto de las especificaciones previas. En particular, el modelo alcanza un $R^2 = 0.6865$, un R^2 ajustado de 0.6378 y un $AICc = -993.4463$, valores que superan no solo al modelo OLS, sino también a los modelos SAR y SEM. Esta mejora sugiere que una fracción relevante de la variación observada en la penetración de banda ancha fija no puede ser capturada completamente mediante un único patrón espacial promedio, sino que responde a relaciones cuyo peso cambia según la localización geográfica.

Tabla 11: Resumen del modelo GWR

Indicador	Valor
Bandwidth óptimo	75.0000
AICc	-993.4463
R^2 global	0.6865
R^2 ajustado global	0.6378

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.

Desde una perspectiva comparativa, este resultado es especialmente relevante. El OLS explicaba aproximadamente el 48 % de la variación comunal de la conectividad fija, mientras que el SEM permitía mejorar el ajuste global incorporando dependencia territorial en el error. No obstante, el GWR muestra que incluso después de considerar esa estructura espacial promedio, todavía existe una mejora significativa cuando se permite que los coeficientes varíen localmente. En términos analíticos, esto indica que la heterogeneidad espacial no constituye un detalle secundario del fenómeno, sino una dimensión central para comprender la brecha digital comunal en Chile.

La Figura 10 refuerza esta lectura mediante la comparación entre valores observados y predichos para OLS, SEM y GWR. Visualmente, las predicciones del modelo local se distribuyen de manera más próxima a la diagonal de referencia, lo que sugiere una mayor capacidad para seguir la variación empírica observada en la penetración comunal de banda ancha fija. Esta mejora no debe interpretarse únicamente como un avance técnico en ajuste, sino como evidencia de que la brecha digital no responde a una única lógica territorial uniforme, sino a configuraciones locales diferenciadas.

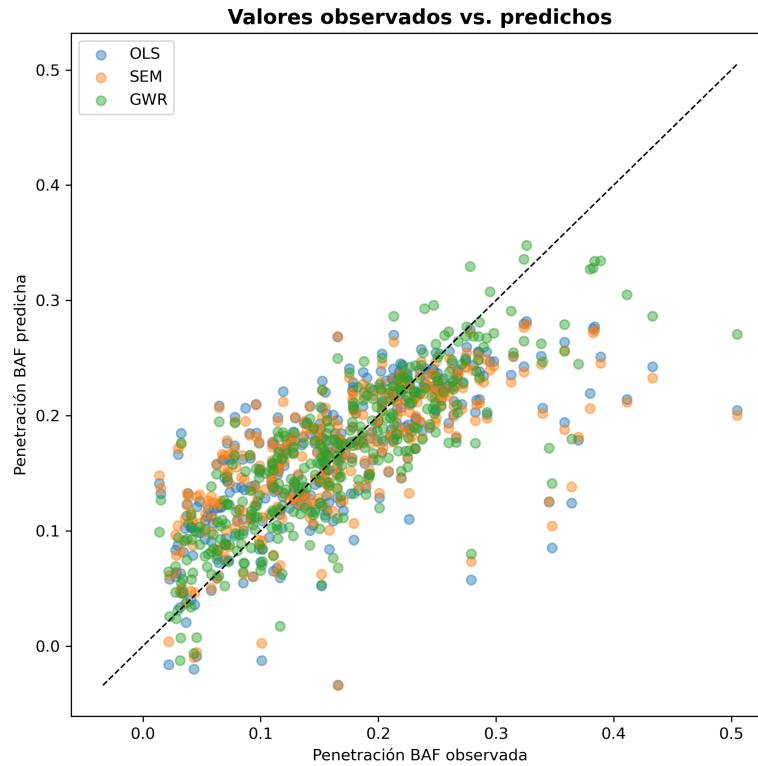


Figura 10: Valores observados versus predichos para OLS, SEM y GWR.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

En consecuencia, el GWR no solo mejora el ajuste estadístico del modelo, sino que aporta una lectura más consistente con la geografía real del problema. Si el SEM permitió mostrar que la conectividad comunal está influida por una estructura territorial global latente, el GWR demuestra que esa estructura no actúa de manera uniforme y que sus determinantes presentan intensidades diferenciadas a lo largo del territorio nacional.

5.6.2. Variación espacial de los coeficientes locales e interpretación territorial

La principal contribución del GWR radica en permitir que cada variable explicativa adopte una intensidad distinta según la localización geográfica. La Tabla [12](#) resume el rango de variación de los coeficientes locales estimados. Como puede observarse, todas las variables presentan heterogeneidad espacial relevante, lo que confirma que el comportamiento promedio descrito por el SEM oculta diferencias territoriales importantes en la forma en que ruralidad y pobreza se asocian con la conectividad fija comunal.

Tabla 12: Rangos de coeficientes locales del modelo GWR

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio
Intercepto	0.1274	0.4854	0.2911
Pct. rural	-0.3308	-0.0348	-0.1634
Pobreza por ingresos	-1.5381	0.7410	-0.5442
Pobreza multidimensional	-0.7882	0.6398	-0.0996
Local R^2	0.3020	0.9600	0.6403

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados obtenidos en Python.

En el caso del porcentaje de población rural, el coeficiente local es consistentemente negativo en todo el territorio, aunque con distinta intensidad. Sus valores oscilan entre -0.3308 y -0.0348 , con un promedio de -0.1634 , lo que indica que la ruralidad constituye el determinante territorial más estable del rezago en conectividad fija. Esta consistencia refuerza lo ya observado en OLS, SAR y SEM: la dispersión poblacional, la menor densidad y las dificultades logísticas de despliegue continúan siendo un obstáculo estructural robusto para la expansión de la banda ancha fija. Sin embargo, el GWR agrega un matiz fundamental: ese efecto no es homogéneo. La Figura 11 muestra que existen territorios donde la ruralidad castiga mucho más severamente la penetración de banda ancha que en otros, sugiriendo que la misma condición territorial no produce idénticos efectos según el contexto regional o local en que se inserta.

GWR - Coeficiente local de ruralidad

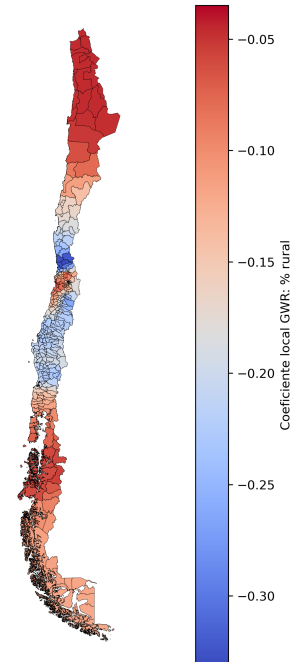


Figura 11: Coeficiente local GWR del porcentaje de población rural.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

La pobreza por ingresos presenta una variación aún más intensa. Sus coeficientes locales oscilan entre -1.5381 y 0.7410 , con un promedio de -0.5442 . En términos agregados, el efecto dominante continúa siendo negativo, lo que resulta coherente con la idea de que las restricciones monetarias limitan la capacidad de los hogares para costear servicios y sostener el acceso digital. No obstante, la amplitud del rango evidencia que este efecto no se manifiesta con igual fuerza en todas las comunas. La Figura 12 ilustra esta heterogeneidad y sugiere que, mientras en ciertos territorios la pobreza monetaria constituye un factor decisivo de rezago digital, en otros su influencia se debilita o incluso cambia de signo.

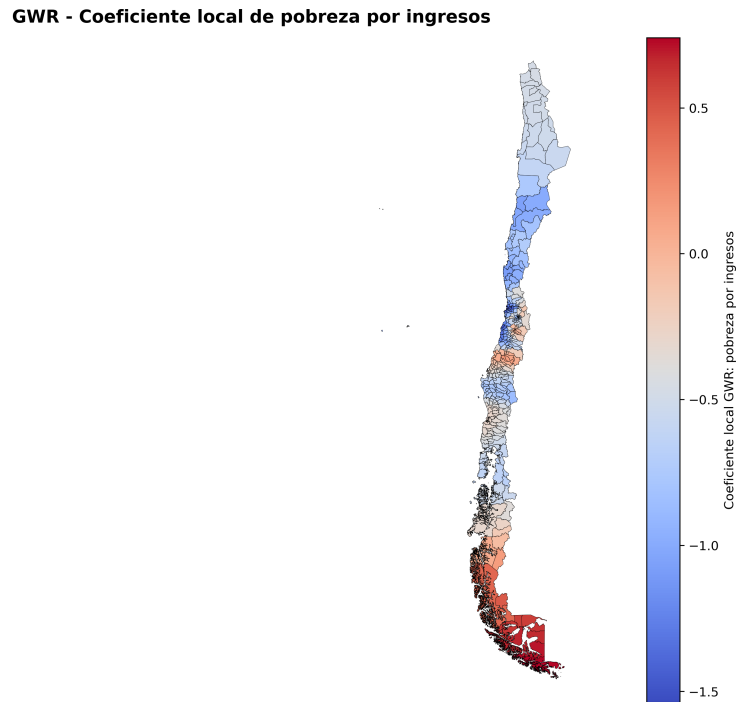


Figura 12: Coeficiente local GWR de pobreza por ingresos.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

Estos cambios locales de signo deben interpretarse con cautela. No constituyen evidencia de una relación causal inversa simple entre pobreza y conectividad, sino que indican que el efecto local de la pobreza por ingresos depende del contexto territorial específico y de su interacción con otros factores no observados que también varían espacialmente. En algunos casos, una comuna puede registrar alta pobreza por ingresos, pero simultáneamente estar inserta en entornos con mejor infraestructura relativa, proximidad a polos urbanos o políticas de conectividad que amortigüen parcialmente ese rezago. En otros, la pobreza monetaria puede reforzar con mucha mayor intensidad la exclusión digital. Lo importante aquí no es sobre-reaccionar frente al signo local positivo, sino reconocer que el vínculo entre vulnerabilidad económica y conectividad no presenta una intensidad uniforme a lo largo del territorio.

La pobreza multidimensional también exhibe heterogeneidad espacial relevante, con coeficientes que varían entre -0.7882 y 0.6398 , y un promedio de -0.0996 . Aunque esta variable no se cartografía

en el cuerpo principal para evitar una sobrecarga visual del capítulo, sus resultados confirman que las privaciones estructurales más amplias tampoco operan de forma homogénea entre comunas. En algunos contextos, estas carencias parecen reforzar claramente el rezago digital; en otros, su asociación local se vuelve más débil o ambigua. Esta evidencia refuerza una idea central de la tesis: la exclusión digital no puede leerse únicamente como un problema de infraestructura o ingreso, sino como una configuración territorial más compleja, en la que distintas dimensiones de vulnerabilidad actúan con intensidades variables.

Finalmente, el R^2 local varía entre 0.3020 y 0.9600, con un promedio de 0.6403, lo que confirma que la capacidad explicativa del modelo tampoco es homogénea en el espacio. La Figura 13 permite identificar territorios donde el modelo local representa mejor la variación observada y otros donde el ajuste es comparativamente menor. Este resultado es especialmente importante, porque muestra que incluso una especificación flexible como el GWR no captura con la misma precisión toda la diversidad comunal del país. En aquellas zonas con menor R^2 local, es razonable suponer que persisten factores contextuales adicionales no representados directamente en la base de datos, tales como calidad efectiva de infraestructura, historia de inversión, presencia de operadores, topografía o características institucionales locales.

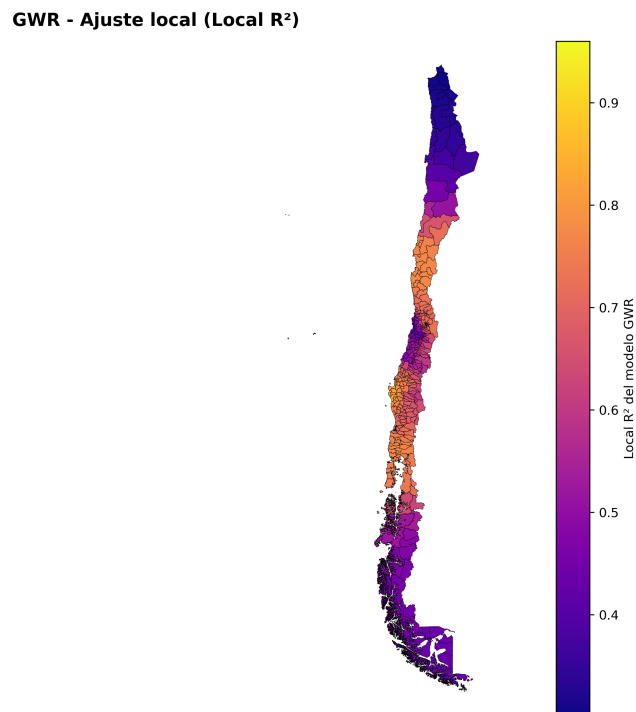


Figura 13: Distribución espacial del R^2 local del modelo GWR.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos procesados en Python.

Desde una lectura integrada, el GWR permite afirmar que la brecha digital comunal en Chile combina dos propiedades simultáneas: una estructura espacial global discernible y una heterogeneidad local significativa en la intensidad de sus determinantes. La ruralidad mantiene un efecto negativo consistente, pero variable en magnitud; la pobreza por ingresos y la pobreza multidimensional

exhiben comportamientos territoriales más complejos; y el poder explicativo del modelo cambia sustantivamente entre comunas. En consecuencia, el GWR complementa de manera decisiva la lectura entregada por el SEM: mientras este último describe adecuadamente la estructura espacial promedio del fenómeno, el modelo local revela que dicha estructura no es territorialmente uniforme y que, por lo tanto, una política pública basada exclusivamente en diagnósticos agregados corre el riesgo de subestimar diferencias relevantes entre territorios.

En síntesis, la incorporación del GWR refuerza una de las conclusiones analíticas más importantes del estudio: la brecha digital en Chile no solo es desigual y espacialmente dependiente, sino también territorialmente heterogénea en la forma en que sus factores explicativos operan. Esta constatación resulta especialmente valiosa para la discusión final del capítulo, ya que sugiere que las intervenciones públicas no deberían apoyarse únicamente en promedios nacionales o regionales, sino en diagnósticos capaces de distinguir qué dimensiones del rezago digital predominan en cada territorio y con qué intensidad lo hacen.

5.7. Robustez, alcances e implicancias para la política pública

Los resultados obtenidos a lo largo de este capítulo permiten avanzar desde una caracterización descriptiva de la brecha digital hacia una interpretación territorial más integrada del fenómeno. En primer lugar, la evidencia cartográfica y descriptiva mostró una distribución comunal altamente desigual de la penetración de banda ancha fija. En segundo término, el análisis exploratorio espacial confirmó que dicha desigualdad no se distribuye aleatoriamente, sino que presenta autocorrelación espacial global y agrupamientos locales significativos. Finalmente, la comparación entre modelos econométricos permitió establecer que la incorporación explícita de estructura espacial mejora la representación empírica del problema y que, además, la intensidad de los efectos asociados a ruralidad y pobreza no es homogénea entre comunas. Sobre esta base, el presente apartado busca consolidar el alcance interpretativo de los hallazgos y discutir sus implicancias para la focalización territorial de políticas públicas de conectividad.

5.7.1. Robustez estadística, límites inferenciales y alcance analítico

Desde una perspectiva metodológica, los resultados del estudio presentan un grado relevante de consistencia interna. La existencia de dependencia espacial quedó respaldada tanto por el Índice de Moran Global como por los clústeres LISA, lo que valida la pertinencia del enfoque espacial adoptado. A su vez, el modelo OLS permitió identificar una primera asociación negativa entre conectividad fija, ruralidad y pobreza, mientras que los diagnósticos posteriores mostraron que dicha especificación no era suficiente como modelo final, debido a la presencia de heterocedasticidad y dependencia espacial residual. Este hallazgo justifica la transición hacia modelos espaciales globales, cuya incorporación mejora de forma clara el ajuste del análisis.

La robustez del resultado central también se aprecia en la estabilidad del signo de algunas asociaciones a través de distintas especificaciones. En particular, la ruralidad mantiene un efecto negativo en OLS, SAR, SEM y GWR, lo que permite considerarla como el determinante territorial más estable del rezago en conectividad fija comunal. De forma similar, la pobreza por ingresos conserva un efecto promedio predominantemente negativo, aunque con una variación espacial más intensa. La pobreza

multidimensional también presenta una asociación negativa promedio, especialmente visible en los modelos espaciales globales, aunque su comportamiento local resulta más heterogéneo. En conjunto, esta convergencia refuerza la idea de que la brecha digital en Chile no responde a un único factor aislado, sino a una combinación de restricciones territoriales y socioeconómicas que interactúan entre sí.

No obstante, la solidez estadística de los resultados no debe confundirse con una capacidad inferencial irrestricta. En primer lugar, el estudio se basa en datos secundarios y en una unidad de análisis agregada a nivel comunal, por lo que las asociaciones estimadas deben interpretarse como relaciones territoriales y no como evidencia causal concluyente. En segundo término, la escala comunal impide capturar heterogeneidades intra-comunales, lo que introduce una limitación asociada al problema de la unidad de área modificable (MAUP). Esto implica que una comuna con indicadores promedio relativamente favorables aún podría contener sectores o localidades con rezagos digitales severos que permanecen invisibilizados en la agregación territorial.

A ello se suma la existencia probable de factores contextuales no observados que no pudieron incorporarse explícitamente en la base de datos, tales como calidad efectiva del servicio, historia de inversión territorial, competencia entre operadores, topografía, continuidad física de redes o capacidades institucionales locales. La importancia de estos factores se vuelve especialmente visible en el modelo SEM, donde la significancia del parámetro espacial sugiere la presencia de una estructura territorial latente en el error, y también en el GWR, donde los cambios locales de magnitud e incluso de signo en algunos coeficientes muestran que el comportamiento del fenómeno depende fuertemente del contexto. En consecuencia, los modelos estimados no deben leerse como una explicación exhaustiva del problema, sino como una aproximación robusta y aplicada que logra capturar parte importante de su organización territorial.

En este marco, el principal aporte analítico de la tesis no reside en afirmar relaciones causales cerradas, sino en demostrar tres hechos empíricos de gran relevancia: primero, que la brecha digital comunal en Chile presenta una estructura espacial estadísticamente significativa; segundo, que los modelos espaciales ofrecen una representación más adecuada que el OLS convencional; y tercero, que los determinantes del rezago digital no operan con la misma intensidad en todo el territorio. Estos tres hallazgos constituyen, en conjunto, una base suficientemente sólida para orientar una discusión aplicada sobre política pública territorialmente diferenciada.

5.7.2. Implicancias para la focalización territorial de políticas públicas

Desde una perspectiva de política pública, los resultados obtenidos sugieren que la brecha digital en Chile no debería enfrentarse mediante estrategias homogéneas aplicadas de forma indiferenciada sobre todo el territorio. La evidencia del modelo SEM muestra que existe una estructura espacial promedio del fenómeno y que parte del rezago en conectividad responde a factores territoriales latentes no observados directamente. A su vez, el GWR revela que incluso esa estructura promedio oculta diferencias locales importantes en la intensidad con que operan la ruralidad y la pobreza. En otras palabras, las causas del rezago digital no son idénticas entre comunas, y por ello las respuestas públicas tampoco deberían serlo.

Desde el enfoque de Ingeniería Civil Industrial, esta constatación tiene una implicancia directa sobre la asignación eficiente de recursos públicos bajo restricción presupuestaria. Los resultados del

análisis espacial pueden interpretarse como una base técnica para priorizar territorialmente el gasto del Estado en conectividad, distinguiendo entre inversiones de capital en infraestructura (*CAPEX*) y mecanismos de apoyo a la demanda o sostenimiento del acceso (*OPEX*). En este sentido, el valor aplicado del modelo no radica solo en identificar dónde existe mayor rezago digital, sino en contribuir a decidir dónde una unidad adicional de gasto público podría generar un mayor retorno social en términos de cobertura, inclusión y equidad territorial.

Una primera implicancia clara se relaciona con la ruralidad. Dado que esta variable mantiene un efecto negativo consistente en todas las especificaciones y presenta una intensidad local variable, los territorios donde dicho coeficiente es más severo deberían ser considerados prioritarios para inversiones de *CAPEX* asociadas a expansión física de infraestructura, reducción de costos de despliegue, mejora de redes de acceso y fortalecimiento de conectividad en zonas dispersas o de baja densidad. En estos espacios, el problema parece responder con mayor claridad a restricciones estructurales de oferta, por lo que soluciones centradas exclusivamente en demanda o alfabetización digital resultarían insuficientes si no van acompañadas de una mejora material en el acceso.

Una segunda implicancia se vincula con la pobreza por ingresos. La heterogeneidad observada en el coeficiente local sugiere que, en numerosos territorios, la restricción económica continúa siendo una barrera relevante para el acceso efectivo a conectividad fija. Esto apunta a la necesidad de complementar las políticas de infraestructura con instrumentos de *OPEX* orientados a la asequibilidad, tales como subsidios focalizados, apoyo a hogares vulnerables, reducción de barreras de entrada o mecanismos que permitan sostener financieramente el acceso a servicios digitales de calidad. No obstante, el hecho de que este efecto no tenga la misma intensidad en todas las comunas también indica que una política uniforme de subsidio nacional podría ser menos eficiente que una focalización territorial basada en evidencia espacial.

Una tercera implicancia refiere a la pobreza multidimensional y, más ampliamente, a la inclusión digital. Los resultados sugieren que en ciertos territorios las carencias estructurales más amplias refuerzan el rezago de conectividad, mientras que en otros su influencia se debilita. Esto refuerza la necesidad de articular las políticas de conectividad con intervenciones complementarias en alfabetización digital, capacidades de uso, mediación tecnológica y fortalecimiento institucional local. En consecuencia, la política pública no debería reducir la brecha digital a un problema puramente sectorial de telecomunicaciones, sino abordarla como una expresión territorial de exclusión más compleja, donde el retorno social de la inversión depende de la coordinación entre infraestructura, asequibilidad y capacidades de apropiación.

La evidencia espacial también permite avanzar hacia una lógica más refinada de priorización y secuenciación de intervenciones. Los clústeres *Low-Low* identificados en el análisis LISA representan territorios donde el rezago no constituye un caso aislado, sino una condición compartida entre comunas vecinas. En estos espacios, las intervenciones podrían beneficiarse de enfoques supracomunales o regionales, aprovechando economías de escala en la expansión de infraestructura y evitando decisiones fragmentadas comuna por comuna. Del mismo modo, los territorios con menor R^2 local en el GWR indican áreas donde los factores incorporados en el modelo explican menos adecuadamente la conectividad observada, lo que sugiere la necesidad de diagnósticos complementarios antes de asignar recursos de forma intensiva. Esto es particularmente importante para evitar una focalización simplista basada únicamente en promedios agregados.

En términos operacionales, los resultados del capítulo permiten concebir el análisis espacial desarrollado como una herramienta de apoyo a la decisión pública. Más que entregar una solución única, el modelo contribuye a construir un criterio de priorización territorial, donde las comunas pueden ordenarse no solo según su nivel de rezago, sino también según el tipo de barrera que parece predominar en cada una: déficit de infraestructura, restricción económica, vulnerabilidad estructural o presencia de factores contextuales no observados. Esta diferenciación es especialmente valiosa desde una lógica industrial, porque permite estructurar portafolios de intervención más eficientes y coherentes con la realidad territorial del país.

En síntesis, los resultados del capítulo permiten sostener que la focalización territorial de políticas públicas de conectividad debe avanzar en al menos tres direcciones complementarias: i) priorización de territorios donde la ruralidad actúa como barrera estructural severa para el despliegue; ii) incorporación de instrumentos de asequibilidad en territorios donde la restricción económica limita de forma decisiva el acceso; y iii) diseño de estrategias integrales de inclusión digital allí donde las carencias estructurales exceden la mera ausencia de infraestructura. Desde esta perspectiva, el principal valor aplicado del análisis espacial desarrollado en la tesis no consiste únicamente en describir dónde hay más o menos conectividad, sino en aportar evidencia para maximizar el retorno social de la inversión pública, optimizando la asignación territorial de recursos estatales en telecomunicaciones.

6. Conclusiones

La presente investigación tuvo como propósito analizar la brecha digital en Chile desde una perspectiva espacial, considerando la distribución comunal del acceso a conectividad fija y su relación con factores territoriales y socioeconómicos. A partir de una metodología cuantitativa aplicada, basada en Sistemas de Información Geográfica, análisis exploratorio de datos espaciales y modelos econométricos espaciales globales y locales, el estudio permitió avanzar desde una lectura descriptiva de la desigualdad digital hacia una comprensión territorial más profunda de sus patrones de concentración, dependencia y heterogeneidad. En este sentido, el aporte central de la tesis no radica únicamente en constatar que existen diferencias de conectividad entre comunas, sino en demostrar que dichas diferencias presentan una organización espacial significativa y que, por lo tanto, requieren herramientas analíticas capaces de incorporar explícitamente el territorio como dimensión relevante del problema.

En relación con el objetivo general, los resultados permiten sostener que la brecha digital comunal en Chile no se distribuye de manera aleatoria ni homogénea. Por el contrario, la penetración de banda ancha fija presenta diferencias importantes entre territorios, evidenciando una separación marcada entre comunas con mayores niveles de integración urbana, mejores condiciones relativas de infraestructura y mayor acceso a conectividad fija, frente a comunas rurales, dispersas o estructuralmente rezagadas. Esta constatación confirma que la brecha digital no puede reducirse a un problema exclusivamente técnico de cobertura, ni tampoco explicarse únicamente desde indicadores agregados a nivel nacional o regional. Más bien, se trata de un fenómeno socioespacial en el que interactúan infraestructura, localización geográfica, condiciones socioeconómicas, restricciones de mercado y dependencia territorial. Por ello, el análisis desarrollado permite reforzar la idea de que la conectividad digital debe ser comprendida como una infraestructura habilitante del desarrollo, cuya distribución desigual puede reproducir o profundizar otras formas de exclusión territorial.

Respecto de los objetivos específicos, la investigación permitió, en primer lugar, cuantificar el estado actual de la brecha digital a nivel comunal mediante la construcción y validación de una base espacial integrada. La utilización de la penetración de banda ancha fija como variable dependiente permitió aproximarse al acceso territorial a conectividad fija, identificando una dispersión considerable entre comunas. Esta variabilidad empírica constituye un hallazgo relevante, ya que muestra que los promedios generales pueden ocultar realidades locales muy distintas. En segundo lugar, el análisis exploratorio de datos espaciales confirmó la existencia de patrones territoriales significativos de alta y baja conectividad. El Índice de Moran Global evidenció autocorrelación espacial positiva, mientras que los indicadores LISA permitieron identificar clústeres de ventaja y rezago digital. En conjunto, estos resultados muestran que la desigualdad digital no corresponde simplemente a la suma de comunas aisladas con bajo acceso, sino a una estructura territorial organizada, donde las condiciones de conectividad tienden a agruparse espacialmente.

En tercer lugar, los modelos econométricos permitieron estimar la asociación estadística entre la desigualdad digital comunal y variables socioeconómicas y territoriales. El modelo OLS entregó una primera aproximación al fenómeno, mostrando asociaciones negativas entre la penetración de banda ancha fija, la ruralidad y la pobreza por ingresos. Sin embargo, los diagnósticos posteriores evidenciaron que la especificación lineal convencional no era suficiente para representar adecuadamente la estructura espacial de los datos. La presencia de heterocedasticidad y dependencia espacial residual justificó la estimación de modelos SAR y SEM, los cuales permitieron incorporar explícitamente la

dimensión territorial en la modelación. Entre ellos, el modelo SEM presentó el mejor desempeño global según los criterios utilizados, lo que sugiere que parte relevante de la dependencia espacial se manifiesta a través de factores territoriales no observados directamente, tales como historia de inversión, calidad efectiva de infraestructura, presencia de operadores, topografía o capacidades institucionales locales.

La incorporación del modelo GWR permitió complementar esta lectura desde una perspectiva local, mostrando que los factores asociados al rezago digital no operan con la misma intensidad a lo largo del territorio nacional. La ruralidad apareció como el factor más establemente asociado a menores niveles de conectividad fija, manteniendo una relación negativa en las distintas especificaciones estimadas. No obstante, el modelo local permitió observar que la magnitud de esta asociación varía entre comunas, lo que confirma que una misma condición territorial puede tener efectos más severos en algunos contextos que en otros. La pobreza por ingresos y la pobreza multidimensional también presentaron asociaciones promedio negativas, aunque con una mayor heterogeneidad espacial. Esta evidencia es especialmente relevante, porque permite afirmar que la brecha digital chilena no solo es desigual y espacialmente dependiente, sino también territorialmente heterogénea. En otras palabras, no basta con saber dónde hay menor conectividad; también es necesario comprender qué tipo de barrera predomina en cada territorio y con qué intensidad se manifiesta.

A pesar de la consistencia de los resultados, es fundamental interpretarlos con cautela estadística. La investigación no permite afirmar que la ruralidad o la pobreza causen directamente menores niveles de conectividad fija, ya que el estudio posee un diseño transversal, utiliza datos secundarios y trabaja con información agregada a escala comunal. Por lo tanto, los coeficientes estimados deben entenderse como evidencia de asociación estadística y territorial, no como prueba causal concluyente. Esta distinción es relevante para mantener coherencia con el alcance metodológico declarado en la tesis y para evitar una lectura determinista de los resultados. El aporte del estudio no consiste en establecer relaciones causales cerradas, sino en demostrar que la brecha digital presenta una estructura espacial significativa, que los modelos convencionales pueden ser insuficientes cuando existe dependencia territorial y que los factores asociados al rezago digital no se expresan de manera uniforme en todo el país.

Desde el punto de vista de la política pública, los hallazgos obtenidos sugieren que las estrategias homogéneas de conectividad, diseñadas únicamente sobre la base de promedios nacionales o regionales, pueden resultar insuficientes para enfrentar un fenómeno territorialmente diferenciado. La evidencia espacial permite avanzar hacia una lógica de focalización más precisa, donde las comunas no sean priorizadas solo por su nivel de rezago, sino también por el tipo de restricción que parece predominar en ellas. En territorios donde la ruralidad aparece como una barrera estructural más intensa, las intervenciones deberían orientarse principalmente a inversiones de infraestructura, expansión de redes, reducción de costos de despliegue y fortalecimiento de la conectividad en zonas dispersas o de baja densidad. En comunas donde la pobreza por ingresos se asocia con menor conectividad, las políticas de infraestructura deberían complementarse con instrumentos de asequibilidad, tales como subsidios focalizados o mecanismos de apoyo a la demanda. Finalmente, en territorios donde las carencias multidimensionales son más relevantes, la política de conectividad debería articularse con estrategias de alfabetización digital, capacidades de uso y fortalecimiento institucional local.

La relación de esta investigación con la Ingeniería Civil Industrial se expresa precisamente en esta dimensión aplicada del análisis. La brecha digital puede ser entendida como un problema de

planificación, priorización y asignación eficiente de recursos bajo restricciones presupuestarias. Desde esta disciplina, no basta con identificar que existe una desigualdad, sino que resulta necesario generar criterios técnicos que permitan orientar decisiones, jerarquizar territorios, distinguir tipos de intervención y maximizar el retorno social de la inversión pública. En este sentido, el uso de herramientas cuantitativas, modelos espaciales, análisis de datos y criterios de eficiencia territorial permite vincular el problema de la conectividad con competencias propias de la Ingeniería Civil Industrial. La tesis transforma datos comunales dispersos en información útil para la toma de decisiones, contribuyendo a estructurar portafolios de intervención más pertinentes, diferenciados y coherentes con la realidad territorial del país.

Asimismo, el estudio permite ampliar la comprensión tradicional de eficiencia. En el caso de la conectividad digital, una política pública eficiente no es necesariamente aquella que maximiza cobertura agregada al menor costo posible, sino aquella que logra asignar recursos considerando las desigualdades territoriales preexistentes, las barreras específicas de cada comuna y el retorno social asociado a mejorar el acceso en zonas históricamente rezagadas. Desde esta perspectiva, la Ingeniería Civil Industrial no se limita a la optimización de procesos productivos o empresariales, sino que también puede aportar al diseño de sistemas públicos más inclusivos, sostenibles y territorialmente justos. La aplicación de modelos espaciales al análisis de brecha digital constituye, por tanto, una forma concreta de integrar eficiencia, equidad y evidencia empírica en la toma de decisiones públicas.

No obstante, la investigación presenta limitaciones que deben ser reconocidas. En primer lugar, el uso de la comuna como unidad de análisis impide observar desigualdades intra-comunales, por lo que es posible que existan microterritorios con rezagos severos dentro de comunas que presentan indicadores promedio favorables. En segundo lugar, la penetración de banda ancha fija permite aproximarse al acceso territorial a conectividad, pero no captura completamente dimensiones como velocidad real, estabilidad del servicio, latencia, competencia entre operadores, disponibilidad efectiva de fibra óptica o experiencia de uso de los hogares. En tercer lugar, el carácter transversal del estudio impide analizar trayectorias temporales o evaluar el efecto de políticas públicas específicas a lo largo del tiempo. Finalmente, la presencia de dependencia espacial en los errores y la variación local de los coeficientes sugieren que existen factores contextuales no observados que inciden en la conectividad comunal y que no pudieron ser incorporados directamente en la base utilizada.

Estas limitaciones no debilitan el aporte del estudio, sino que delimitan adecuadamente su alcance. La investigación es coherente con una memoria aplicada de carácter cuantitativo y territorial, pero no pretende agotar todas las dimensiones de la brecha digital. Su contribución principal consiste en demostrar que la dimensión espacial importa, que la desigualdad digital tiene una estructura territorial identificable y que la focalización de políticas públicas requiere considerar tanto el nivel de rezago como el tipo de barrera predominante en cada comuna. En este sentido, los resultados obtenidos constituyen una base empírica útil para avanzar hacia diagnósticos más sofisticados, especialmente en aquellos territorios donde los modelos explican menos adecuadamente la variación observada y donde podrían requerirse estudios complementarios de carácter técnico, institucional o cualitativo.

Como líneas de trabajo futuro, se recomienda profundizar el análisis en al menos cuatro direcciones. En primer lugar, incorporar información longitudinal que permita observar la evolución temporal de la brecha digital y evaluar si los patrones espaciales identificados se mantienen, se intensifican o se reducen con el tiempo. En segundo lugar, complementar la penetración de banda ancha fija

con indicadores de calidad efectiva del servicio, tales como velocidad real, estabilidad de conexión, latencia, precios relativos, disponibilidad tecnológica y competencia entre operadores. En tercer lugar, avanzar hacia escalas de análisis más desagregadas, idealmente a nivel de localidad, zona censal o manzana censal, con el fin de capturar desigualdades intra-comunales y posibles micro-desiertos digitales. En cuarto lugar, incorporar variables adicionales asociadas a alfabetización digital, edad, género, escolaridad, capacidades institucionales locales y características técnicas de infraestructura, siempre que se encuentren disponibles de manera homogénea y georreferenciada.

Finalmente, la investigación permite concluir que la superación de la brecha digital en Chile requiere avanzar desde una lógica de cobertura agregada hacia una estrategia de justicia espacial basada en evidencia territorial. La conectividad no debe entenderse únicamente como un servicio tecnológico, sino como una infraestructura habilitante para la educación, la productividad, el acceso a servicios públicos, la participación ciudadana y el desarrollo local. Reducir la brecha digital exige reconocer que los territorios no enfrentan las mismas restricciones ni requieren las mismas soluciones. En este marco, el análisis espacial desarrollado aporta una herramienta concreta para orientar decisiones más eficientes, equitativas y territorialmente pertinentes, contribuyendo a que la política pública en telecomunicaciones avance hacia una mayor inclusión digital y una mejor asignación social de los recursos del Estado.

Referencias

- Acepta. (2025). *Brecha digital en chile: En qué estamos y cuáles son los desafíos*. <https://acepta.com/blog/2025/04/16/brecha-digital-en-chile/>. (Consultado en 2025)
- Araya Morales, J. I., y Estay Jara, H. (2006). *Brecha digital regional de chile* (Tesis de Master, Universidad de Chile). Descargado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/108384>
- Arellano-Gualdrón, J., y Silva, J. (2021). Digital divide in latin america: A spatial analysis perspective. *Journal of Information Policy*, 11, 145–172. doi: 10.5325/jinfopoli.11.2021.0145
- Baeza-Yates, R. (2020). *Desconexión y brecha digital en chile durante la epidemia de covid-19*. <https://rbaeza-yates.medium.com/desconexión-y-brecha-digital-en-chile-durante-la-epidemia-de-covid-19-e88caf75de5c>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2017). *Estrategias de alfabetización digital en chile*. https://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29191/1/Minuta_62_17_Estrategias_de_Alfabetización_Digital_en_Chile.pdf
- Billón, M., Lera-López, F., y Marco, R. (2021). Spatial distribution of the digital divide in spain. *Telecommunications Policy*, 45(4), 102100. doi: 10.1016/j.telpol.2021.102100
- Blank, G. (2019). The digital divide among twitter users and its implications for social research. *Social Science Computer Review*, 37(5), 560–576. doi: 10.1177/1461444818797082
- Bustillo, R. (2021). *Analysis of competition policies in five countries of latin america and the caribbean and the post-pandemic recovery period* (Inf. Téc.). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Descargado de <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/ccb9b2dc-1ffc-40e1-8acb-ea9947cf1424>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021). *Estrategia de transformación digital para chile 2035* (Inf. Téc.). Descargado de https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/estrategia_de_transformacion_digital_chile_2035_final_.pdf
- Cooperativa.cl. (2025). *Infraestructura digital desigual: una brecha que no se puede ignorar*. <https://opinion.cooperativa.cl/opinion/economia/infraestructura-digital-desigual-una-brecha-que-no-se-puede-ignorar/2025-05-05/080043.html>
- Correa, T., Pavez, I., y Contreras, J. (2020). Digital inclusion through mobile phones? a comparison between mobile-only and computer users in rural areas. *Information, Communication & Society*, 23(2), 276–293. doi: 10.1080/1369118X.2018.1500625
- Fundación Adultos Mayores Chile. (2024). *Inclusión digital*. <https://famchi.cl/inclusion-digital/>
- Gobierno de Chile. (2025). *Lanzamos el plan brecha digital cero para que todas y todos tengan acceso a conectividad*. <https://www.gob.cl/noticias/lanzamos-el-plan-brecha-digital-cero-para-que-todas-y-todos-tengan-acceso-conectividad-independiente-del-lugar-en-que-viven/>
- Graham, M. (2019). *Digital economies at global margins*. MIT Press. Descargado de https://idrc-crdi.ca/sites/default/files/sp/Images/idl-57429_2.pdf
- Helsper, E. J. (2021a). *The digital disconnect: The social causes and consequences of digital inequalities*. London: SAGE Publications. (Fundamental para el Pilar 1 sobre causas sociales y exclusión.)
- Helsper, E. J. (2021b). *The digital disconnect: The social causes and consequences of digital inequalities*. London: SAGE Publications.
- Instituto de Previsión Social. (2021). *Estudio diagnóstico de brecha digital en usuarias del ips* (Inf. Téc.). Descargado de https://cdn.ips.gob.cl/files/shares/ESTUDIOS%20DE%20GÉNERO%202024/2021_Estudio_Brecha_Digital_en_el_IPS_2021.pdf

- Instituto Nacional de Estadísticas. (2024). *Resultados censo 2024*. <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>
- International Telecommunication Union. (2023). *Measuring digital development: Facts and figures 2023*. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/facts/default.aspx>
- Martínez, C. A. (2010). *¿una experiencia que contribuye a la reducción de la brecha digital? estudio de caso: Colonias digitales aprender chile* (Tesis de Master, Universidad de Chile). Descargado de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105825>
- Ministerio de Educación and Ministerio Secretaría General de Gobierno. (2025). *Plan ciudadanía y alfabetización digital 2025-2026*. <https://ciudadaniadigital.mineduc.cl/recurso/plan-ciudadania-alfabetizacion-digital-2025/>
- OECD. (2021). *Bridging the digital divide: Regional and local strategies* (Inf. Téc.). Organisation for Economic Co-operation and Development. Descargado de <https://www.oecd.org/digital/bridging-the-digital-divide.htm> (Aporta contexto internacional actualizado sobre políticas locales.)
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2021a). *Bridging the digital divide: Regional and local strategies* (Inf. Téc.). Paris: OECD Publishing. Descargado de <https://www.oecd.org/digital/bridging-the-digital-divide.htm>
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2021b). *Bridging the digital divide: Regional and local strategies* (Inf. Téc.). Paris: OECD Publishing. Descargado de <https://www.oecd.org/digital/bridging-the-digital-divide.htm>
- Organización de las Naciones Unidas Chile. (2025). *Transformación digital en zonas rurales: innovador proyecto de conectividad*. <https://chile.un.org/es/280935-transformaci3n-digital-en-zonas-rurales-gobierno-de-chile-y-onu-lanzan-innovador-proyecto-de>
- Rivera Polo, F. (2023). *Brecha digital e inclusión* (Inf. Téc.). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Descargado de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34246/1/Minuta_46_2023_Brecha_Digital_e_Inclusion_rev.pdf
- Soja, E. W. (2010). *Seeking spatial justice*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2006). *Campaña alfabetización digital*. <https://www.subtel.gob.cl/campana-alfabetizacion-digital/>
- Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2020). *Diagnóstico inclusión digital*. https://www.subtel.gob.cl/plansocial/img/Diagnostico_inclusion_digital_vf.pdf
- Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2021). *Acuerdo nacional por la conectividad para reducir la brecha digital*. <https://www.subtel.gob.cl/gobierno-e-industria-de-las-telecomunicaciones-anuncian-acuerdo-nacional-para-reducir-la-brecha-digital/>
- Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2024a). *Informe anual de conectividad*. <https://www.subtel.gob.cl/estudios-y-estadisticas/internet/>
- Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2024b). *¿cómo nació la ley de internet como servicio público?* <https://www.subtel.gob.cl/internet-como-servicio-publico/>
- Subsecretaría de Telecomunicaciones. (2025). *Conectividad para la educación: 400 escuelas contarán con conectividad digital*. <https://www.subtel.gob.cl/conectividad-para-la-educacion-con-un-100-de-implementacion-del-proyecto-subtel-anuncia-que-mas-de-400-escuelas-contaran-con-conectividad-digital/>
- Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Industrial. (2025). *Desigualdad en infraestructura digital en chile*. <https://www.ingenieriaindustrial-usach.cl/noticias/desigualdad-en-infraestructura-digital-en-chile/>
- Van Dijk, J. A. G. M. (2020). *The digital divide*. Polity Press.

Villalobos, A., y Hernández, L. (2021). Explicación socioespacial de la brecha digital en el espacio intrametropolitano de toluca. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 36(4), 1401–1430. Descargado de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-74252021000400159