UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Evaluación de Impacto del Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) en la Reducción de la Pobreza Multidimensional en Colombia (2015-2020)

Andrés Felipe Sabogal Ramírez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Economista

Tutores

Héctor Mauricio Posada Duque, Doctor (PhD) en Economía

Carlos Felipe Gaviria Garces, Doctor (PhD) en Economía

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Económicas

Economía

Medellín, Antioquia, Colombia

2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
1803

Cita	(Sabogal Ramírez, 2025)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Sabogal Ramírez, A, F. (2025). *Evaluación de Impacto del Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) en la Reducción de la Pobreza Multidimensional en Colombia (2015-2020)* [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Seleccione biblioteca, CRAI o centro de documentación UdeA (A-Z)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a la memoria de David Mateo Sabogal Leal, mi sobrino amado, quien en su lucha me enseño el valor de la vida. Ahora existo buscando ser digno de volverte a ver.

Agradecimientos

Agradezco a mi madre que siempre me ha apoyado, a mi padre y mi hermano que son mi ejemplo y a todas las personas que han enriquecido mi pensamiento y mi espirito durante los años.

Tabla de contenido

Resumen 9

Abstract 10

Introducción 11

1 Planteamiento del problema 13

2 Objetivos 15

2.1 Objetivo general 15

2.2 Objetivos específicos 15

2.2.1 Objetivo específico 1. 15

2.2.2 Objetivo específico 2. 15

2.2.3 Objetivo específico 3. 15

2.2.4 Objetivo específico 4. 15

3 Revisión de la Literatura 17

4 Metodología 23

4.1 Análisis descriptivo de variables 28

4.2 Especificación del modelo 35

5 Resultados 38

6 Conclusiones 44

Referencias 47

Lista de tablas

Tabla 1 *Media y desviación estándar de la muestra por variable.* 29

Tabla 2 *Factores de inflación de la varianza (VIF)* 35

Tabla 3 *Cálculo del filtro - umbral de la variable RURALIDAD* 38

Tabla 4 *Resultados de la Prueba de Wald Modificada para Heterocedasticidad* 40

Tabla 5 *Resultados modelo TWFE* 40

Tabla 6 *Interpretación de resultados del modelo TWFE* 41

Lista de figuras

Figura 1 *Posibles vías interrelacionadas hacia la educación, los ingresos y los resultados de salud a través de la electrificación de los hogares* 20

Figura 2 *Incidencia de la pobreza multidimensional 2010 - 2021* 22

Figura 3 *Flujo de datos para cálculo del ICEE* 25

Figura 4 *Evolución de las variables del año 2015 al 2020* 29

Figura 5 *Distribución de la variable RURALIDAD por categoría del DNP* 30

Figura 6 *Media por departamento del índice de cobertura de energía eléctrica rural* 31

Figura 7 *Media por departamento de la variable desempeño del índice de pobreza multidimensional* 32

Figura 8 *Comparación de las variables D_IPM y ICEE _RUR entre los años 2015 y 2020 por categoría* 33

Figura 9 *Comparación de las variables D_IPM y ICEE_RUR por dummy PDET, ZOMAC o PNIS entre los años 2015 y 2020* 34

Siglas, acrónimos y abreviaturas

AOM	Administración, Operación y Mantenimiento
CND	Centro Nacional de Despacho
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social
CREG	Comisión de Regulación de Energía y Gas
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DNP	Departamento Nacional de Planeación
ENCV	Encuesta Nacional de Calidad de Vida
FAER	Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de Zonas Rurales Interconectadas
FAZNI	Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de Zonas No Interconectadas
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
ICEE	Índice de Cobertura de Energía Eléctrica
ICM	Índice de Ciudades Modernas
IPEM	Índice de Pobreza Energética Multidimensional
IPM	Índice de Pobreza Multidimensional
IPSE	Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas
kWh	Kilovatio hora
MEM	Mercado de Energía Mayorista
MME	Ministerio de Minas y Energía
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OR	Operador de Red
PECOR	Plan de Expansión de Cobertura de los Operadores de Red
PDET	Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial
PERS	Plan de Energización Rural Sostenible
PIEC	Plan Indicativo de Expansión de Cobertura
PNER	Plan Nacional de Electrificación Rural
PNIS	Programa Nacional Integral de sustitución de Cultivos Ilícitos

PNRRI	Planes Nacionales para la Reforma Rural Integral
PRONE	Programa de Normalización de Redes Eléctricas
RRI	Reforma Rural Integral
SIN	Sistema Interconectado Nacional
SGR	Sistema General de Regalías
SSPD	Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
TWFE	Two Way Fixed Effects (Modelo de Efectos Fijos en Dos Vías)
UPME	Unidad de Planeación Minero Energética
VCS	Viviendas con Servicio
VSS	Viviendas Sin Servicio
ZNI	Zonas No Interconectadas
ZOMAC	Zonas Más Afectadas por el Conflicto Armado

Resumen

Esta investigación analiza el impacto del Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) en el desempeño del índice de pobreza multidimensional en Colombia durante el periodo 2015-2020. Utilizando un modelo econométrico de efectos fijos en dos vías (TWFE), con información de panel balanceado para 1122 entidades territoriales entre municipios y áreas no municipalizadas, se evalúa cómo la ampliación de la cobertura de energía eléctrica rural incidió sobre el desempeño del Índice de Pobreza Multidimensional. Los resultados indican que el aumento en la cobertura energética rural contribuye positivamente a la mejora en el desempeño del Índice de Pobreza Multidimensional municipal, destacando mayor significancia estadística en los efectos de los municipios con mayor concentración de viviendas rurales. El estudio incorporó variables de control relevantes, como productividad, fortaleza institucional, tecnología, seguridad, gobernanza, competitividad y complementariedad económica, obtenidas del Índice de Ciudades Modernas. Se concluye que la electrificación rural tuvo efectos modestos pero positivos en la reducción de la pobreza multidimensional, así como también se identificaron desafíos asociados con brechas departamentales históricas en materia de infraestructura que resulta en heterogeneidad en los logros frente a la pobreza multidimensional, que compromete la sostenibilidad del impacto a largo plazo, y enfatiza la importancia de políticas complementarias que potencien los beneficios del acceso a la electricidad.

Palabras clave: electrificación rural, evaluación de impacto, pobreza multidimensional, política pública, efectos fijos en dos vías, desarrollo rural.

Clasificación JEL: O18, H54, Q48, C21

Abstract

This research analyzes the impact of the National Rural Electrification Plan (PNER) on the performance of the Multidimensional Poverty Index in Colombia during the period 2015-2020. Using a Two-Way Fixed Effects (TWFE) econometric model and balanced panel data from 1122 territorial entities, including municipalities and non-municipalized areas, this study assesses how the expansion of rural electricity coverage influenced the performance of the Multidimensional Poverty Index. The results indicate that increased rural electricity coverage significantly contributed to improving municipal performance of the Multidimensional Poverty Index outcomes, with greater statistical significance observed in municipalities with higher rurality. The study incorporated relevant control variables such as productivity, institutional strength, technology, security, governance, competitiveness, and economic complementarity, derived from the Modern Cities Index. It concludes that rural electrification had positive effects on the reduction of multidimensional poverty; however, challenges were also identified related to historical departmental gaps in infrastructure, leading to heterogeneous achievements in poverty reduction. This compromises the sustainability of the long-term impact and underscores the importance of complementary policies to enhance the benefits of electricity access.

*Keywords***:** rural electrification, impact evaluation, multidimensional poverty, public policy, two-way fixed effects, rural development.

JEL Classification: O18, H54, Q48, C21

Introducción

La energía eléctrica constituye un factor esencial para el desarrollo económico y social, especialmente en contextos rurales, donde su acceso promueve mejoras significativas en la calidad de vida y contribuye directamente a la reducción de las desigualdades socioeconómicas. En Colombia, el Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) establecido por el Decreto 884 de 2017, ha representado un esfuerzo significativo por parte del Estado para ampliar la cobertura eléctrica en las áreas rurales, históricamente excluidas del acceso a servicios básicos y marcadas por altos índices de pobreza multidimensional (Colombia. Ministerio de Minas y Energía [MME], 2023; Colombia. Presidencia de la República, 2016).

En el caso colombiano, la implementación del PNER ha coincidido con un contexto complejo de desigualdad regional, diversidad geográfica y ruralidad dispersa, lo que ha supuesto importantes retos técnicos y económicos. La expansión de la cobertura de energización rural se refleja en el incremento del Índice de Cobertura de Energía Eléctrica Rural. Para analizar la relación entre electrificación y pobreza multidimensional se creó una variable denominada RURALIDAD, calculada como la proporción de viviendas rurales sobre el total de viviendas de cada municipio, la cual permitió identificar las áreas con predominancia rural y se contrastó con las categorías definidas por el DNP (ciudades y aglomeraciones, intermedios, rural y rural disperso).

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto del PNER sobre el desempeño del Índice de Pobreza Multidimensional en Colombia, utilizando un modelo econométrico de efectos fijos en dos vías (TWFE). Para ello, se empleó un panel balanceado que incluye 1122 entidades territoriales, entre municipios y áreas no municipalizadas, durante el periodo 2015-2020, lo que permitió capturar la heterogeneidad no observada tanto a nivel municipal como temporal. Adicionalmente, se realizó la prueba del estimador de Wald modificado para determinar la presencia de heterocedasticidad de forma grupal entre unidades en los efectos del tratamiento y validar así la implementación del modelo elegido y aplicar errores robustos.

Además, se incorporaron variables de control relevantes como productividad, fortaleza institucional, tecnología, seguridad, gobernanza, competitividad y complementariedad económica, obtenidas del Observatorio del Sistema de Ciudades del DNP en el marco del Índice de Ciudades Modernas (ICM). Estas variables permitieron controlar los efectos diferenciados de otras políticas públicas y condiciones locales que también influyen en la pobreza multidimensional.

La relevancia de este estudio radica en proporcionar evidencia empírica sólida que permita fundamentar futuras decisiones de política pública, optimizar el uso de recursos y contribuir al diseño de estrategias más efectivas para la reducción de la pobreza multidimensional en áreas rurales de Colombia por medio de la electrificación e identificar los posibles canales de transmisión en relación con los indicadores que componen las dimensiones del IPM. Por lo tanto, los resultados de esta investigación no solo buscan evaluar el impacto del PNER, sino también aportar insumos claves para la formulación de políticas energéticas integrales y sostenibles, orientadas a garantizar el acceso universal y equitativo a la energía como eje fundamental del desarrollo rural y la justicia social.

Los resultados encontrados en este estudio indican que la expansión de la cobertura eléctrica rural ha tenido efectos positivos y significativos en el desempeño de la pobreza multidimensional, especialmente en los municipios con mayores niveles de ruralidad. Asimismo, se observó que las variables relacionadas con la fortaleza institucional y la competitividad local también juegan un papel crucial en la efectividad del PNER, lo que subraya la importancia de una implementación integral de políticas públicas que consideren simultáneamente factores energéticos y socioeconómicos para lograr avances sustanciales en el desarrollo rural colombiano.

1 Planteamiento del problema

En Colombia, la universalización del acceso a la energía eléctrica en zonas rurales y dispersas persiste como un desafío estructural pese a el fortalecimiento del sector eléctrico en Colombia en los últimos 30 años. Este reto se aborda dentro de un marco normativo que incluye las Leyes 142 y 143 de 1994, que establecen el régimen de los servicios públicos domiciliarios y las actividades del sector eléctrico respectivamente, y la Ley 1715 de 2014, que impulsa la integración de energías renovables no convencionales (FNCER) en la matriz energética (Colombia. Congreso de la República, 1994 a, 1994 b, 2014). En este contexto, y articulado con los esfuerzos de construcción de paz contenidos en la Reforma Rural Integral (RRI), el Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER), se erige como el principal instrumento sectorial para cerrar la brecha energética rural. Conforme a la responsabilidad estatal emanada de dichas leyes de garantizar una cobertura eléctrica que satisfaga las necesidades básicas, el PNER prioriza a municipios de áreas predominantemente rurales, así como municipios que han sido categorizados previamente en Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET), Zonas Más Afectadas por el Conflicto Armado (ZOMAC), y municipios en el Programa Nacional Integral de Sustitución de Cultivos de Uso Ilícito (PNIS), buscando asegurar que las viviendas rurales cuenten con este servicio esencial para el desarrollo (Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE], 2025; Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2019).

Según el Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (PIEC), para 2018 existían más de 1,2 millones de viviendas sin servicio de energía eléctrica, concentradas en departamentos como La Guajira, Chocó, Vichada, Amazonas y Magdalena, lo que evidencia la persistencia de desigualdades estructurales a nivel municipal y departamental.

Investigaciones recientes en Colombia han mostrado que la electrificación rural puede tener impactos positivos en la reducción de la pobreza y el desarrollo local, pero así mismo enfatizan en la necesidad de evaluar la continuidad del servicio en horas cuando se utilizan FNCER y la importancia de un seguimiento institucional a la evaluación y mantenimiento de los proyectos, así como la implementación de subsidios tarifarios (Garcés, 2021). No obstante, la evidencia empírica sobre el impacto real del PNER y de los programas nacionales para la reforma rural integral (PNRRI) en la reducción de la pobreza multidimensional a nivel municipal es limitada o nula. Persisten desafíos metodológicos para evaluar rigurosamente la efectividad de estas intervenciones,

derivados de la calidad y disponibilidad de la información base, la heterogeneidad territorial, la coexistencia de múltiples programas sociales y las dificultades para la georreferenciación y caracterización de las viviendas sin servicio. Los documentos oficiales del plan reconocen que "se desconoce con exactitud los impactos reales en los territorios donde se han invertido mayormente los recursos del Estado" y señalan como un desafío clave la necesidad de implementar un "seguimiento e impacto de la intervención territorial". En este contexto, este trabajo presenta una novedad fundamental: ofrece una de las primeras evaluaciones de impacto trascendiendo los análisis tradicionales. El propio Plan Indicativo de Expansión de la Cobertura (PIEC) reconoce limitaciones en el cálculo del índice de cobertura de energía eléctrica (ICEE) debido a la complejidad en la consolidación de los datos de viviendas electrificadas de diversas fuentes DANE, UPME, IPSE, OR (MME, 2023; UPME, 2019). Adicionalmente en la evaluación de alternativas tecnológicas para la expansión de cobertura prima el costo económico y la cantidad de viviendas beneficiadas, lo que rezaga la implementación de proyectos de electrificación en territorios de baja densidad poblacional y con baja infraestructura existente (Torres, 2015), lo que dificulta avances en los indicadores de pobreza multidimensional en municipios de características predominantemente rurales.

Importa subrayar que en el marco de la RRI el propósito explícito del PNER no es, en sentido estricto, reducir la pobreza sino cerrar brechas de paz territorial y equidad. Por ello, la evaluación del impacto sobre el IPM se justifica como resultado de bienestar derivado de cómo el acceso y la continuidad del servicio eléctrico habilitan usos productivos, acumulación de capital humano (educación y tiempo de estudio), mejoras en salud (refrigeración de alimentos y medicamentos, reducción de humo intradomiciliario con sustitución de combustibles), y seguridad (iluminación y movilidad), todos componentes que inciden en privaciones del IPM, por lo tanto, analizar el efecto del PNER sobre la pobreza no solo es pertinente, sino que está alineado con los criterios operativos del plan y permite comprender en profundidad su contribución real al cierre de brechas y al bienestar rural, objetivos explícitos de la RRI. En este sentido, la pregunta de investigación guía es ¿en qué medida la expansión de cobertura eléctrica rural asociada al PNER se relaciona con mejoras en el desempeño del IPM municipal entre 2015 y 2020, y cómo identificarlas rigurosamente mediante un diseño TWFE que atienda la heterogeneidad territorial y las limitaciones de información?

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Estimar el efecto del Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) sobre la reducción de la pobreza multidimensional en los municipios de Colombia durante el periodo 2015-2020.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 Objetivo específico 1. Construir una base de datos panel municipal para el periodo 2015-2020, mediante la recolección sistemática, integración, validación y armonización de datos de múltiples fuentes oficiales con el fin de: (a) determinar con precisión la cronología y magnitud de la implementación de los proyectos PNER, definiendo así el momento del tratamiento a nivel municipal; y (b) identificar las brechas de cobertura eléctrica, los niveles de pobreza multidimensional y otras variables socioeconómicas relevantes en relación a la data disponible.

2.2.2 Objetivo específico 2. Identificar el efecto del PNER sobre el desempeño del IPM municipal mediante el diseño de un modelo de Efectos Fijos en Dos Vías (TWFE), con efectos fijos por municipio y año, incorporando un conjunto de covariables estructurales para controlar diferencias observables, efectuando verificaciones de robustez y análisis de heterogeneidad, con especial atención en municipios predominantemente rurales.

2.2.3 Objetivo específico 3. Analizar la validez interna de los resultados obtenidos en la estimación del efecto del PNER sobre la pobreza multidimensional municipal, identificando la magnitud y significancia estadística, así como las potenciales fuentes de sesgo, amenazas a la validez y limitaciones metodológicas presentes en el estudio, con el fin de garantizar una atribución confiable de los efectos observados a la política.

2.2.4 Objetivo específico 4. Analizar los canales de transmisión y los mecanismos causales, tanto directos como indirectos, a través de los cuales la implementación del Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) influye en las dimensiones clave del Índice de Pobreza

Multidimensional (condiciones educativas, niñez y juventud, trabajo, salud, vivienda y servicios públicos), con el fin de elucidar los procesos subyacentes a su impacto y proveer una base empírica para el diseño de políticas públicas complementarias o variables de resultado intermedias.

3 Revisión de la Literatura

En Colombia, la condición de pobreza energética que afecta a muchas personas en el territorio nacional debe comprenderse como consecuencia de una serie de factores estructurales y de una política pública que, desde hace décadas, se ejecuta por inercia en el sector minero energético, sin lograr superar estas brechas. La energía y los servicios energéticos representan recursos esenciales para el bienestar humano, ya que facilitan aspectos como la iluminación, la cocción, la conservación de alimentos, el calentamiento de agua y el confort térmico. Considerar la energía como un derecho fundamental podría propiciar que los ciudadanos alcancen mayores niveles de desarrollo económico, social y cultural (M. Bernal et al., 2022; Rosado et al., 2025).

Diversas investigaciones internacionales han evidenciado los efectos positivos del acceso a la energía eléctrica sobre dimensiones clave del bienestar humano, como la educación, la salud y la productividad económica, sin embargo, la magnitud e intensidad de estos impactos varían significativamente dependiendo del contexto territorial y socioeconómico específico (Bensch et al., 2011; Khandker et al., 2013). En el caso colombiano, la política pública para expandir la cobertura eléctrica en áreas rurales se ha formulado no solo desde una perspectiva económica, sino también como una estrategia integral orientada a reducir brechas territoriales para la construcción de paz y avanzar en la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 7 sobre energía asequible y no contaminante. Este enfoque se enmarca en los lineamientos de la Transición Energética Justa y se articula con la Reforma Rural Integral establecida en el Acuerdo Final de Paz (MME, 2018; UPME, 2018b, 2019).

En Colombia el Ministerio de Minas y Energía ha identificado tres hechos importantes; el primero es la magnitud y persistencia de la brecha de cobertura en departamentos con alta dispersión y barreras geográficas; el segundo es la asignación y priorización condicionada por restricciones presupuestales, costos por vivienda y densidad, que pueden sesgar la expansión hacia áreas relativamente menos costosas; y el tercero es el rol de calidad y continuidad del servicio y del diseño tarifario para materializar beneficios en bienestar. Estos antecedentes motivan los fundamentales del modelo. Primero, la electricidad expande el conjunto de oportunidades (educación, salud, ingreso), lo que reduce privaciones del IPM. Segundo, a nivel municipal, factores como estructura productiva, institucionalidad, tecnología, seguridad, ruralidad,

infraestructura básica y demografía influyen tanto en la probabilidad de expansión de cobertura como en el desempeño del IPM.

Los estudios analizados emplean diversas técnicas econométricas para evaluar el impacto de proyectos energéticos sobre variables socioeconómicas. Por ejemplo, en Ruanda se han utilizado Propensity Score Matching (PSM) y diferencias en diferencias (DiD) para controlar sesgos de selección al evaluar la electrificación rural, identificando efectos positivos significativos en el uso de iluminación, aunque menores o no significativos en ingresos y educación infantil una vez controladas las diferencias regionales (Bensch et al., 2011). Asimismo, un enfoque de datos de panel aplicado en Vietnam reporta mejoras significativas en ingresos y calidad de vida como resultado de la electrificación (Khandker et al., 2013). En el contexto africano, la evaluación del impacto de la microhidroelectricidad en Kenia mediante PSM revela beneficios en ahorro de costos energéticos, aunque efectos contradictorios en el tiempo de estudio de los niños (Karumba & Muchapondwa, 2018).

En Vietnam se reportan impactos positivos y significativos en el ingreso y educación gracias a la electrificación rural, lo cual evidencia beneficios multidimensionales directos y sostenibles (Khandker et al., 2013). En términos de condiciones de vivienda y servicios básicos, la electrificación facilita la sustitución de combustibles contaminantes, lo cual se traduce en mejores condiciones de salud y seguridad doméstica (Almeshqab & Ustun, 2019; Karumba & Muchapondwa, 2018). Asimismo, la literatura sobre transición energética justa incorpora explícitamente componentes sociales, reconociendo el acceso equitativo a la energía como condición necesaria para que el despliegue de nuevas tecnologías no reproduzca ni profundice desigualdades históricas (Guzmán et al., 2023).

La evaluación del Banco Mundial reexamina costos y beneficios de la electrificación rural para cuantificar beneficios mediante disposición a pagar por iluminación y horas de TV, y contrastar con costos de suministro, metodológicamente recomienda curvas de demanda no lineales y control de sesgos de selección en las estimaciones (World Bank, 2008). En resultados, concluye que los impactos directos son robustos en iluminación y consumo residencial, pero los efectos en ingresos y productividad son heterogéneos y modestos salvo cuando hay componentes para usos productivos, y constata que la mayor parte de beneficios privados se concentra en luz y TV, que los hogares pobres enfrentan barreras de conexión como costos fijos y que los programas con subsidios inteligentes y el financiamiento a la conexión y educación del consumidor mejoran la

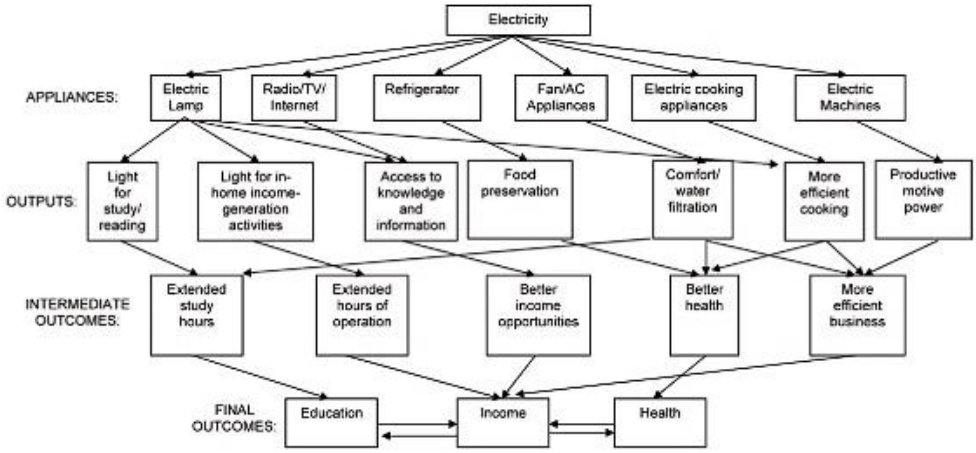
equidad y el aprovechamiento del uso de la energía. Para soluciones fuera de red, identifica beneficios ambientales por CO_2 evitado, pero retornos económicos generalmente menores que la extensión de red debido a mayores costos unitarios y limitaciones de implementación.

El estudio de Alkire, Kanagaratham y Vollmer (2021) explora la relación entre privación de electricidad y pobreza multidimensional utilizando microdatos del índice de pobreza multidimensional global de 2020 para 107 países, con desagregaciones rural–urbano y análisis de cambios en 13 países, aplica coeficientes de redundancia para medir solapamientos de privaciones y calcula razones de coprivación por pares de indicadores, además de comparar intensidades de pobreza entre subgrupos. El estudio encuentra que 15.7% de la población carece de electricidad y que 99.4% de quienes están privados en electricidad sufren al menos otra privación simultánea, por lo que 75% de los "energéticamente pobres" son pobres multidimensionales, con altas intensidades, y la electricidad resulta el indicador de estándares de vida más interconectado y el mejor predictor dentro de esa dimensión. Revela que en 12 de 13 países se observan caídas estadísticamente significativas en privación de electricidad, y los casos con mayores reducciones en IPM muestran también mejoras rápidas en acceso eléctrico, sugiriendo que expandir la electrificación se asocia con descensos de pobreza severa y co-privaciones en saneamiento, vivienda y combustibles de cocina.

La **Figura 1** extraída de Khandker et al. (2013) ilustra un encadenamiento causal de cinco eslabones: (1) el acceso a electricidad propicia la adopción de aparatos (lámparas, radios, refrigeradores, motores); (2) estos generan outputs inmediatos como iluminación de mejor calidad, conservación de alimentos, acceso a información, fuerza motriz productiva—que (3) se traducen en resultados intermedios como más horas de estudio, extensión de la jornada laboral en microempresas y mejores condiciones sanitarias; todo ello (4) impulsa resultados finales en educación, ingreso y salud, que (5) retroalimentan el bienestar del hogar y la comunidad. En la presente investigación el modelo propuesto TWFE para Colombia busca estimar el efecto agregado sobre el Desempeño del Índice de Pobreza Multidimensional, cuyo constructo incorpora dimensiones de niñez, educación, salud, condiciones de vivienda y empleo. Así, la posible relación de múltiples canales microeconómicos descritos en la figura se puede relacionar con las dimensiones del cálculo del índice de pobreza multidimensional IPM.

Figura 1

Posibles vías interrelacionadas hacia la educación, los ingresos y los resultados de salud a través de la electrificación de los hogares



Fuente: Khandker et al. (2013).

Los hallazgos de Garcés (2021) y Groth (2020) coinciden en que la electrificación rural es una condición necesaria pero no suficiente para el desarrollo local y la reducción de la pobreza multidimensional. La evidencia empírica muestra impactos positivos en variables intermedias, como la calidad de la iluminación y la reducción del uso de combustibles contaminantes, pero los efectos sobre el ingreso, el empleo y la expansión de actividades productivas son limitados.

Estudios como el de Groth (2020) destacan impactos positivos y heterogéneos sobre dimensiones del bienestar asociadas con la pobreza multidimensional, por ejemplo, en Tanzania se observa que los sistemas off-grid mejoran sustantivamente la calidad de la iluminación en microempresas rurales, aunque no necesariamente incrementan las horas de operación, lo que subraya la necesidad de servicios complementarios para dinamizar el desarrollo económico local. En esta línea, la evaluación del impacto de la electrificación ha evolucionado desde enfoques unidimensionales hacia el reconocimiento de dinámicas complejas entre acceso energético y desarrollo socioeconómico, donde la causalidad y la magnitud de los efectos en indicadores como ingreso o educación dependen del contexto y de factores locales. Adicionalmente Guzmán et al. (2023) expone que la transición energética no es solo tecnológica, sino que exige una perspectiva socioespacial y de justicia energética que ponga en el centro a las personas, sus prácticas y la gobernanza institucional.

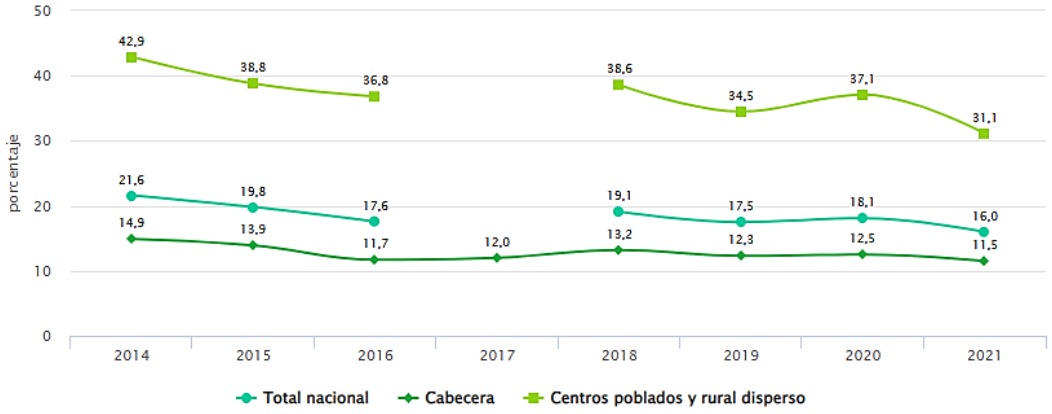
Es importante tener presente que, según el Plan Nacional de Electrificación Rural y el Plan Indicativo de Expansión de la Cobertura, se establecen tres estrategias principales para la universalización del servicio eléctrico en zonas rurales. La primera corresponde a la interconexión al Sistema Interconectado Nacional (SIN), que implica la extensión de redes de transmisión y distribución desde el sistema principal, así como la construcción de infraestructura en el Sistema de Transmisión Regional y en el Sistema de Distribución Local (SDL), aplicable donde la densidad poblacional y la distancia hacen viable técnica y económicamente la conexión. La segunda se enfoca en microrredes y sistemas centralizados, mediante la implementación de generación local (≥1 MW), soluciones híbridas que combinan fuentes convencionales y fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER), y esquemas empresariales adaptados a condiciones de mercado locales. La tercera comprende soluciones fotovoltaicas individuales (soluciones aisladas), incluidos sistemas solares domiciliarios para viviendas dispersas y otras soluciones con FNCER en zonas de muy baja densidad donde la interconexión no es viable. Estas tres estrategias reflejan la heterogeneidad de condiciones de los municipios para la puesta en marcha de alternativas de electrificación (MME, 2018, 2023; UPME, 2019).

Por otra parte, la **Figura *2*** permite reconocer la evolución de la incidencia de la pobreza multidimensional en el periodo 2010-2021, lo que evidencia una reducción sostenida en la incidencia de pobreza multidimensional en Colombia entre los años 2014 y 2021. Se observa una reducción significativa a nivel nacional, pasando de 21,6% en 2014 a 16,0% en 2021. Esta disminución también se presenta diferenciada según área geográfica, en cabeceras se reduce del 14,9% al 11,5%, mientras que, en centros poblados y rural disperso, aunque hay una mejora de 42.9% a 31,1%, los niveles de pobreza siguen siendo considerablemente más altos (DANE, 2021). Se observa así mismo una brecha persistente entre la incidencia de la pobreza multidimensional a nivel de cabeceras municipales y centros poblados y rural disperso, siendo significativamente mayor en las áreas con mayor ruralidad, y muy por encima del promedio nacional.

Esto confirma la persistencia de desigualdades estructurales en zonas rurales y resalta la necesidad de políticas focalizadas como el Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) para abordar la reducción efectiva de la pobreza multidimensional, consolidando el acceso a servicios básicos como la energía eléctrica y contribuyendo así al desarrollo socioeconómico integral en estas áreas.

Figura 2

Incidencia de la pobreza multidimensional 2010 - 2021



Fuente: DANE https://bit.ly/4lV9Voh

En síntesis, la revisión de la literatura evidencia el impacto positivo pero diferenciado que tiene la electrificación rural sobre las condiciones socioeconómicas de las comunidades rurales. Si bien existe consenso sobre el rol facilitador de la energía eléctrica en la reducción de pobreza multidimensional, los resultados varían significativamente según el contexto regional, la metodología utilizada y las estrategias de implementación específicas. Esta heterogeneidad refuerza la importancia de estudios que aborden integralmente la efectividad de políticas como el Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) en Colombia, considerando aspectos clave como la conectividad, el acceso a tecnologías energéticas adecuadas y el fortalecimiento de capacidades locales. La presente investigación contribuye a llenar este vacío mediante una evaluación robusta y rigurosa del efecto del PNER sobre el desempeño del Índice de Pobreza Multidimensional en municipios rurales colombianos entre 2015 y 2020, aportando evidencia clave para mejorar el diseño e implementación de futuras políticas públicas en materia energética (Alphabet, 2025; OpenAI, 2025).

4 Metodología

La investigación adopta un enfoque cuantitativo con un diseño cuasiexperimental de evaluación de impacto *expost*. Su objetivo principal es estimar el efecto causal del Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) sobre la reducción de la pobreza multidimensional a nivel municipal en Colombia, para el periodo comprendido entre 2015 y 2020, para lo cual, haciendo uso del software Stata, se utilizó un modelo de efectos fijos en dos vías (Two-Way Fixed Effects, TWFE) que permite controlar por la heterogeneidad no observable específica de los municipios y por choques agregados temporales que afectan a todos los municipios por igual.

El alcance de esta investigación se delimito al análisis del impacto del PNER sobre la pobreza multidimensional a nivel municipal en Colombia, utilizando datos agregados a nivel vivienda para el periodo 2015-2020. No se realizó una evaluación de impacto a nivel de hogar o individuo debido a las limitaciones de disponibilidad de microdatos georreferenciados por municipio que estén vinculados a la ejecución del PNER.

La investigación comprende 1.103 municipios y las 19 áreas no municipalizadas existentes en el periodo 2015-2020, sumando 1.122 entidades territoriales identificadas en la base de datos por su código DIVIPOLA, nombre municipal y departamento al que pertenece. Se excluye el municipio más reciente, Nuevo Belén de Bajirá, al ser creado en 2024, fuera del marco temporal de los datos. El periodo de estudio 2015–2020 se selecciona porque, al unificar datos de diversas fuentes, constituye la ventana temporal común. Además, abarca los primeros años de implementación del PNER, iniciada en 2017 tras la firma del Acuerdo de Paz en 2016.

En Colombia, la metodología para el cálculo de la pobreza multidimensional fue diseñada por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), usando como base la metodología de Alkire y Foster, y transferida al DANE en el año 2012. El IPM está compuesto por cinco dimensiones: condiciones educativas del hogar, condiciones de la niñez y juventud, salud, trabajo, y por último condiciones de la vivienda (DANE, 2014).

Las 5 dimensiones que componen el IPM involucran 15 indicadores. Los hogares son considerados pobres multidimensionalmente cuando tienen privación en por lo menos el 33,3% de los indicadores. La fuente de información para el cálculo de la pobreza multidimensional es la Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ENCV), que tiene representatividad estadística para los dominios, cabeceras, centros poblados y rural disperso (DANE, 2021), sin embargo, se identificó

un limitante debido a que el DANE publica los datos del IPM por departamento y por región, mas no por municipio, por lo que se optó por hacer uso del índice de pobreza EIS-01-0, que es un indicador sintético de la dimensión de Equidad e Inclusión Social del Índice de Ciudades Modernas (ICM) que expresa el desempeño en el dominio de Pobreza, a partir del uso de la variable estandarizada "índice de pobreza multidimensional" calculado por el DNP (Colombia. Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2023a).

Por lo tanto, la variable dependiente en la presente investigación es el desempeño del índice de pobreza multidimensional, D_IPM_{it} por municipio y por año. Según la información contenida en la metodología del cálculo del Índice de Ciudades Modernas, el D_IPM_{it} es una transformación estandarizada del IPM, calculada por el Observatorio del Sistema de Ciudades (OSC), entidad adscrita al DNP. Este valor oscila entre 0 y 100, donde 100 representa el mejor desempeño posible en términos de pobreza multidimensional a nivel municipal, y 0 el desempeño más bajo.

Según la ficha metodológica del Índice de Ciudades Modernas (DNP, 2023b), la estandarización se realiza mediante la fórmula:

$$z_{i,m} = \left(\frac{x_{i,m} - p_i}{m_i - p_i}\right) * 100 \quad (1)$$

$x_{i,m}$: valor sin estandarizar del indicador i para el municipio m

p_i: valor más bajo aceptable o peor resultado para el indicador i

m_i: mejor resultado, que puede ser una meta de política pública o un percentil alto

$z_{i,m}$: valor estandarizado en el rango [0, 100], donde valores altos indican mejor desempeño

Por otra parte, la variable independiente en esta investigación será el Índice de Cobertura de Energía Eléctrica (ICEE). El ICEE es un ejercicio estadístico realizado por la Unidad de Planeación Minero Energética, la cual realiza una estimación del nivel de cobertura del servicio de energía utilizando fuentes primarias oficiales, y obteniendo como residual el total de viviendas sin cobertura de energía eléctrica (VSS). La "vivienda" para el ICEE es una unidad habitacional completa e independiente, y su contabilización distingue entre las que tienen servicio eléctrico y las que no, y se excluyen las "viviendas tipo cuarto". Esta estimación es insumo para la elaboración del Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica (PIEC), que a su vez es el

estudio técnico que sustenta el proyecto normativo del PNER. El índice de cobertura se calcula como la razón o proporción de las viviendas con servicio sobre las viviendas totales.

$$ICEE = \frac{Viviendas\ con\ servicio}{Viviendas\ totales} = \frac{VCS}{VT} \quad (2)$$

Las viviendas sin servicio se calculan como el residual entre las viviendas totales y las viviendas con servicio

$$VSS = VT - VCS \quad (3)$$

Para el cálculo del ICEE Municipal las viviendas totales se obtienen por un lado de las proyecciones del CNPV 2018 y, por otro lado, para las viviendas con servicio la fuente principal es el sistema único de información (SUI), adscrita a la superintendencia de servicios públicos domiciliarios (SSPD). Si para determinado municipio el dato no se encuentra disponible se toman los datos del Operador de Red para usuarios del SIN, y del IPSE para usuarios en ZNI que hayan sido reportados a la UPME, de lo contrario se toma el dato del Censo 2018 del DANE (UPME, 2018a). Véase el esquema de la metodología en la **Figura *3***.

Figura 3
Flujo de datos para cálculo del ICEE



Fuente: Documento metodológico ICEE (UPME, 2018a)

Es importante destacar que el ICEE se encuentra a nivel Rural, Urbano y total por municipio, para lo cual según la metodología consideran Urbanos, aquellos inmuebles localizados en la Cabecera Municipal, y Rurales, son aquellos inmuebles localizados en el espacio rural del

municipio, conformado por menos de 20 viviendas contiguas o adosadas entre sí o viviendas dispersas, mientras que los Centros Poblados se refieren a una concentración mínima de veinte (20) viviendas contiguas, vecinas o adosadas entre sí, ubicada en área rural y con la presencia de la delimitación de vías vehiculares y peatonales (UPME, 2024).

Adicionalmente, las covariables se incorporan para reducir potenciales sesgos por factores omitidos y controlar otras dimensiones del desarrollo local que podrían afectar simultáneamente tanto la cobertura eléctrica como la pobreza multidimensional. Estas variables provienen en su mayoría del ICM, el cual considera Dimensiones, Dominios (Índices) e Indicadores. En este estudio se tomaron los datos de índices que en principio no estuvieran correlacionados directamente con las variables en las dimensiones del IPM. Dichos índices del ICM son estandarizados entre 0 y 100, siguiendo el mismo procedimiento de la variable dependiente. Los índices tomados se describen a continuación:

- Índice de Productividad: refleja la importancia económica del municipio, excluyendo sectores extractivos, a partir del valor agregado por kilómetro cuadrado y participación en la economía regional. Se calcula a partir de los indicadores: a). Grado de importancia económica (DANE), b). Valor agregado sin sector minería e hidrocarburos (DNP, DANE).
- Índice de Competitividad: incluye tiempo de viaje a centros urbanos, conectividad aérea, volumen de carga transportada, y siniestralidad vial. Se calcula a partir de los indicadores a). Tiempo de viaje del municipio al núcleo más cercano (DNP), b). Categoría aeropuertos según flujo de pasajeros transportados (DNP), c). Carga transportada por carretera desde el municipio por distancia al municipio destino (Ministerio de Transporte), d) Número fallecidos en accidentes de tránsito (ONSV).
- Índice de Complementariedad Económica: mide la integración territorial y flujos logísticos, incluyendo relaciones de carga bidireccional y categoría de ruralidad. Se construye de los indicadores: a). Relaciones bidireccionales y unidireccionales de carga por carretera (DNP, Ministerio de Transporte), b). Categoría de ruralidad (DNP).
- Índice de Gobernanza: capta la pertenencia a esquemas asociativos, prestación regional de servicios públicos y efectividad administrativa. Se construye con los indicadores: a). Pertenencia a esquemas asociativos (DNP), b). Efectividad Regional (acueducto, alcantarillado, aseo, transporte público) (SSPD, DNP).

- Índice de Fortaleza Institucional: evalúa la calidad de la gestión pública, actualizaciones catastrales y ejecución de inversión con recursos propios. Se construye con los indicadores: a). Sentencias de delitos contra la administración pública (Observatorio de Transparencia y Anticorrupción), b). Recaudo Impuesto Predial Unificado por predio (DNP), c). Participación recursos propios en la inversión (CUIPO, Ministerio de Hacienda), d). Estado de actualización catastral urbana y rural (IGAC).
- Índice de Tecnología: relacionado con acceso a conectividad digital, educación superior acreditada y velocidad de banda ancha. Se construye a partir de los indicadores: a). Acceso a TIC y Cobertura acceso internet por banda ancha fija y velocidad de bajada (MinTIC), b). Promedio estudiantes por terminal colegios oficiales (MinTIC).
- Índice de Seguridad: sintetiza tasas de homicidio, lesiones, hurtos, secuestros y extorsiones (por cada 100.000 habitantes), suavizadas por promedio móvil en municipios con baja población. Se construye de los indicadores: a). Tasa de lesiones y agresiones entre personas (Policía Nacional de Colombia y DANE), b). Tasa de homicidios (Policía Nacional Colombia y DANE), c). Tasa hurtos comunes (Policía Nacional de Colombia y DANE), d). Tasa de secuestro (SNARIV y DANE), e). Tasa de extorsiones (Policía Nacional Colombia)

Seguido de esto se creó una variable Dummy de clasificación de los municipios que pertenecen a Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET), Zonas Mas Afectadas por el Conflicto Armado (ZOMAC) o Programa Nacional Integral de Sustitución de Cultivos de Uso Ilícito (PNIS), donde 0 es no pertenece y 1 es pertenece a algún o de estos programas.

Con los datos del UVTR y UVT provenientes de los anexos del ICEE se creó una variable nueva llamada RURALIDAD, la cual representa la relación entre las viviendas rurales con respecto a las viviendas totales por municipio ($UVTR/UVT$). Esta variable se incorporó al modelo dado que se hace necesario extraer de la muestra los municipios con una alta densidad de viviendas urbanas, y dejar una submuestra con los municipios con viviendas predominantemente rurales. Este procedimiento busca mejorar la identificación del efecto causal de la electrificación rural sobre el desempeño del Índice de Pobreza Multidimensional, al focalizar el análisis en territorios donde dicha intervención tiene mayor pertinencia estructural y contextual.

$$RURALIDAD = \frac{Viviendas\ Rurales}{Viviendas\ Totales} = \frac{UVTR}{UVT} \quad (4)$$

Se podrá observar más adelante que el análisis se restringió a los municipios con un índice de ruralidad superior al 55%, lo que da lugar a una submuestra de 705 municipios de los 1.122 incluidos originalmente en el panel. Esta delimitación permite focalizar la evaluación en contextos mayoritariamente rurales, donde la expansión del servicio eléctrico tiene mayor potencial de inducir transformaciones estructurales en las condiciones de vida de la población.

En su conjunto la selección de estas variables y covariables se determinó adoptando el razonamiento de Bernal & Peña (2011), específicamente cuando mencionan que: el evaluador debe tratar de relacionar, de la mejor manera posible, los objetivos, lineamientos y forma de operación del programa, con variables de resultado que se espera que puedan medir de manera relativamente razonable el desempeño del programa.

4.1 Análisis descriptivo de variables

Como punto de partida, se presenta a continuación un análisis descriptivo de las variables empleadas para evaluar el impacto de la electrificación rural sobre la pobreza multidimensional. Con base en el panel de datos final de 1.122 entidades territoriales (municipios y áreas no municipalizadas) para el período 2015–2020, se examinan e interpretan diversas gráficas y tablas a fin de identificar comportamientos característicos de cada variable y sus posibles relaciones con las demás, orientando la interpretación y la modelación posteriores.

En la **Tabla *1*** se resume el número de observaciones, medias y desviaciones estándar de las variables ofreciendo una primera lectura de magnitudes y variabilidad que orienta la interpretación posterior. En primer lugar, se observa que el valor promedio general de la variable D_IPM es de 58.43 puntos. Se destaca el comportamiento de la media del ICEE a nivel general que tiene un valor de 85.31%, mientras que el ICEE a nivel rural es de 77.94%, el ICEE en zonas PDET es de apenas un 71.27% y el ICEE de los municipios categorizados como ZOMAC, PDET o PNIS sube un poco a 73.09%. Se resalta el valor de la variable RURALIDAD que es de 58.72 lo que indica que a nivel agregado la proporción de viviendas rurales con respecto a las viviendas totales por municipio es de un 58,7%.

Tabla 1

Media y desviación estándar de la muestra por variable.

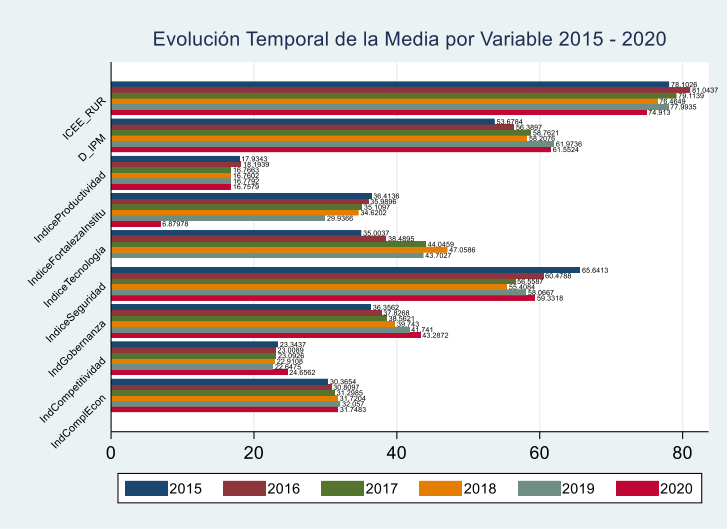
Variable	Obs.	Media	Desv.
D_IPM	6 730	58,43	17,71
RURALIDAD	6 730	0,587	0,236
ICEE_RUR	6 730	77,94	27,65
ICEE	6 730	85,31	19,43
ICEE_PDET	6 730	71,27	30,15
ICEE_ZOMAC_PDET_PNIS	6 730	73,09	28.93
Índice de Productividad	6 730	17,20	12,28
Índice de Fortaleza Institucional	6 730	29,83	16,34
Índice de Tecnología	5 523	41,63	13,92
Índice de Seguridad	6 730	59,25	25,24
Índice de Competitividad	6 730	23,28	14,72
Índice de Complementariedad Económica	6 730	31,33	15,20
Índice de Gobernanza	6 730	39,59	23,01

Notas:

• Datos provenientes del panel balanceado de 1122 municipios (2015-2020). Índice de tecnología no disponible para el año 2020.

Figura 4

Evolución de las variables del año 2015 al 2020



En la **Figura *4*** se presenta el comportamiento agregado de las variables entre 2015 y 2020. Se observan tendencias al alza en el D_IPM, el índice de gobernabilidad y el índice de complementariedad económica. En contraste, el ICEE_ RUR y el índice de fortaleza institucional muestran una trayectoria descendente, al igual que el índice de competitividad, que cae hasta 2020 y luego registra un repunte. El índice de seguridad exhibe un patrón no monótono ya que disminuye hasta 2018 y, a partir de entonces, mejora. El índice de tecnología crece hasta 2019 y

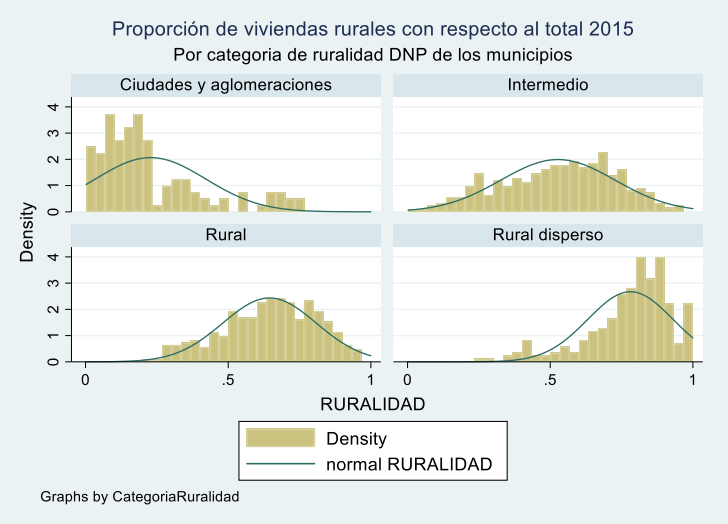
posteriormente desciende, se observa que no se dispone de datos para 2020. Por su parte, el índice de productividad se mantiene relativamente estable a lo largo del período.

El Departamento Nacional de Planeación (DNP) encargado del cálculo del ICM, establece una categorización de ruralidad que permite clasificar los municipios colombianos según su grado de urbanización y características territoriales. Esta clasificación facilita el análisis comparativo del desarrollo municipal y permite realizar un seguimiento diferenciado de las dinámicas territoriales. Para su construcción, se consideran tres criterios fundamentales, la densidad poblacional, la relación entre la población urbana y rural, y la pertenencia al Sistema de Ciudades. A partir de estos criterios, los municipios se agrupan en cuatro categorías, las cuales son: Ciudades y aglomeraciones, Intermedio, Rural y Rural disperso.

Bajo esta tipología del DNP, se examinó para cada categoría la distribución de la variable creada RURALIDAD definida como la proporción de viviendas rurales sobre el total municipal. A mayor cercanía a 1, mayor es la proporción de viviendas rurales en el municipio por categoría.

Figura 5

Distribución de la variable RURALIDAD por categoría del DNP



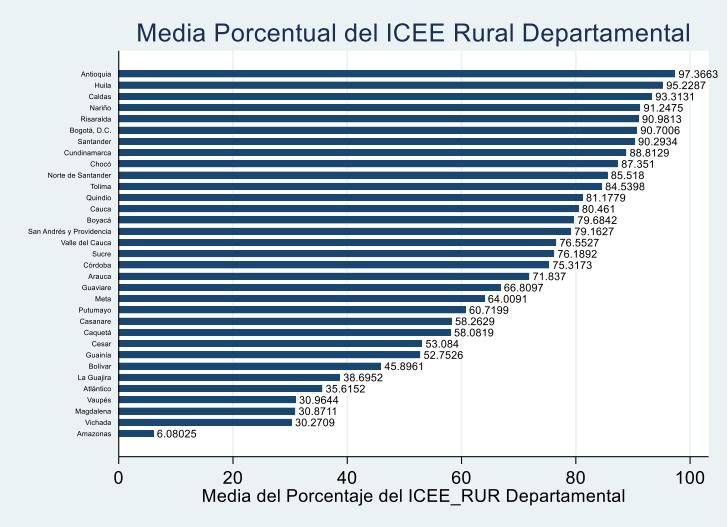
Se puede visualizar en la **Figura *5*** que la categoría “Ciudades y aglomeraciones” concentra la masa de la distribución entre 0 y 0.25, con un pico marcado alrededor de 0.10–0.15, lo que confirma su carácter eminentemente urbano. En la categoría “Intermedio” la densidad adopta una forma aproximadamente normal centrada en 0.45–0.55, simetría que refleja una combinación equilibrada de zonas urbanas y rurales, consistente con la naturaleza mixta de estos municipios.

Para la categoría “Rural”, la distribución se desplaza hacia la derecha, con la mayoría de los municipios entre 0.55 y 0.75, lo que es interesante ya que, aunque predominan las viviendas rurales, subsiste cierta heterogeneidad interna, algunos municipios aún se solapan con la categoría intermedia. Finalmente, Rural disperso presenta una concentración marcada más allá de 0.75 y un pico en torno a 0.80–0.85, evidenciando que en estos municipios mayoritariamente las viviendas se localizan en áreas rurales.

La **Figura *6*** presenta un diagrama de barras que ordena, de menor a mayor, la media departamental en porcentaje del ICEE_RUR. En el extremo inferior se encuentran Amazonas (6,1%), Vichada (30,3%), Magdalena (30,9%), Vaupés (31,0%), Atlántico (35,6%) y La Guajira (38,7%), todos con coberturas rurales inferiores al 40 %. A mitad de la tabla aparecen valores intermedios, desde Bolívar (45,9%) hasta Meta (64,0%). Resulta llamativo el caso del departamento del Chocó, que registra (87,4%), superando a Boyacá (79,7%), Quindío (81,2%) y Tolima (84,5%). En la parte alta destacan Cundinamarca (88,8%), Santander (90,3%) y Bogotá D. C. (90,7%), mientras que los valores máximos corresponden a Caldas (93,3%), Huila (95,2%) y Antioquia (97,4%). En conjunto, la gráfica pone de manifiesto una brecha sustancial entre departamentos con cobertura muy baja y aquellos cercanos a la universalidad del servicio eléctrico rural.

Figura 6

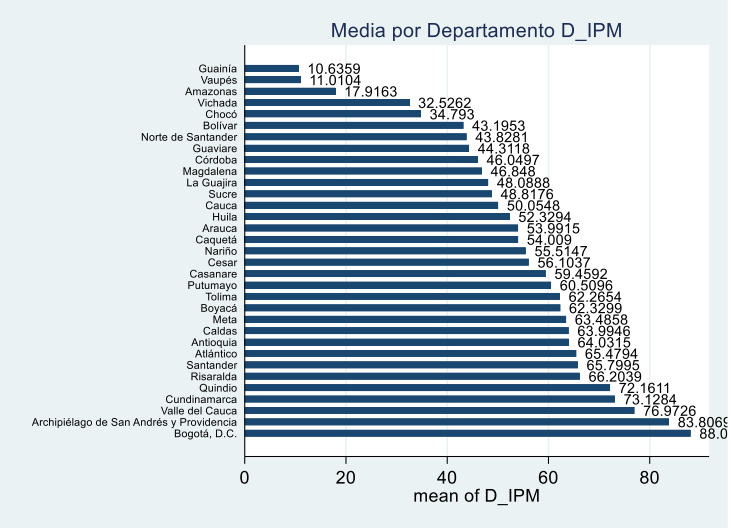
Media por departamento del índice de cobertura de energía eléctrica rural



La **Figura *7*** ordena de menor a mayor la media departamental del Desempeño del Índice de Pobreza Multidimensional (D_IPM). Llaman la atención los valores extremadamente bajos de Guainía (10,64), Vaupés (11,01) y Amazonas (17,92), todos por debajo de 20 puntos. En el otro extremo, Bogotá D. C. encabeza la lista con (88,08), seguida del Archipiélago de San Andrés y Providencia (83,81), Valle del Cauca (76,97), Cundinamarca (73,13) y Quindío (72,16), todos por encima de 70 puntos. Resulta notable el caso de Chocó, que pese a mostrar una alta cobertura de energía eléctrica rural en el gráfico anterior, aquí figura entre los departamentos con peor desempeño (34,79). De manera similar, Antioquia, a pesar de ser líder en ICEE_RUR, se ubica en la novena posición del D_IPM con (64,03), una brecha considerable frente al máximo observado en la capital Bogotá D.C. con (88,03). Estos datos evidencian una variabilidad marcada entre territorios subrayando la heterogeneidad en los logros frente a la pobreza multidimensional.

Figura 7

Media por departamento de la variable desempeño del índice de pobreza multidimensional

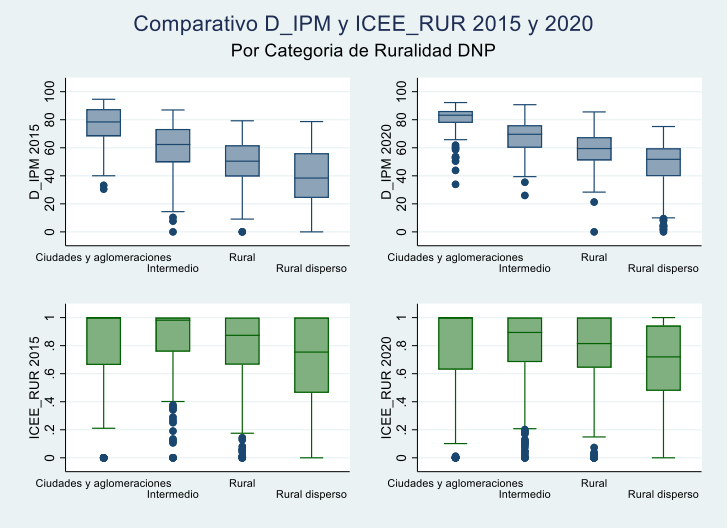


En la **Figura *8*** se hace un análisis comparativo entre los datos de 2015 y 2020 de las variables D_IPM y ICEE_RUR, se observa una mejora general en ambos indicadores. Para el Desempeño del Índice de Pobreza Multidimensional (D_IPM), las medianas de las cuatro categorías de ruralidad se desplazan hacia arriba: “Ciudades y aglomeraciones” pasa de aproximadamente 80 a 85, “Intermedio” de aproximadamente 65 a 70, “Rural” de aproximadamente 55 a 60 y “Rural disperso” de aproximadamente 45 a 55. Además, las cajas se estrechan ligeramente, reflejando menor dispersión interna, aunque continúan existiendo valores

atípicos bajos en los grupos más rurales. El Índice de Cobertura de Energía Eléctrica Rural (ICEE_RUR) muestra un patrón parecido dado que las medianas siguen altas entre 0.7 y 0.8 y se incrementan levemente en 2020, especialmente porque el límite inferior de las distribuciones sube, indicando que los municipios con menor cobertura avanzaron. Pese a estos progresos, se conserva el comportamiento de "Ciudades y aglomeraciones" que lidera en ambos indicadores, mientras que "Rural disperso" continúa rezagado, aunque con mejoras evidentes. En conjunto, los datos sugieren diferencias persistentes entre las categorías.

Figura 8

Comparación de las variables D_IPM y ICEE _RUR entre los años 2015 y 2020 por categoría



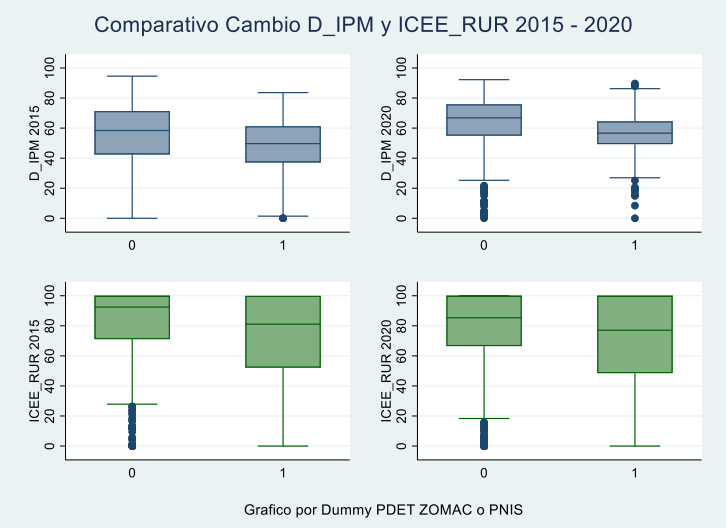
En la **Figura *9*** se visualiza el contraste por pertenencia a programas PDET, ZOMAC o PNIS, para lo cual el valor de 1 en la *Dummy* indica que el municipio pertenece a alguno de estos programas, y la *Dummy* igual a 0 quiere decir que no pertenece a ninguno de estos programas. En el D_IPM, la mediana de los municipios sin programas (*Dummy* = 0) pasa de unos 59 puntos en 2015 a poco más de 66 puntos en 2020, mientras que la de los municipios con programas (*Dummy* =1) sube de cerca de 50 a casi unos 60 puntos, pese a la mejora, la disparidad inicial de unos 8 puntos se mantiene y los valores atípicos bajos siguen concentrándose en los municipios pertenecientes a alguno de los programas.

Para el ICEE_RUR sucede algo distinto, en 2015 la mediana del grupo 0 está alrededor de 0,92 y la del grupo 1 está alrededor de 0,8, sin embargo, en 2020 ambas cajas se desplazan hacia abajo a aproximadamente 0,85 para el grupo 0 y 0,75 para el grupo 1, lo que indica que la cobertura

eléctrica rural media disminuyó ligeramente en ambos conjuntos, conservando la brecha de unos 0,10 puntos. Además, la dispersión continúa siendo mayor en los municipios pertenecientes a alguno de los programas, ya que sus bigotes inferiores alcanzan valores casi nulos, reflejando casos con electrificación muy limitada. En síntesis, de 2015 a 2020 los municipios categorizados como PDET, ZOMAC o PNIS mejoran en el desempeño de pobreza multidimensional, pero siguen rezagados, mientras que la cobertura eléctrica rural evidencia descensos leves y una variabilidad interna comparativamente más pronunciada en estos territorios.

Figura 9

Comparación de las variables D_IPM y ICEE_RUR por dummy PDET, ZOMAC o PNIS entre los años 2015 y 2020



Para garantizar la validez de las estimaciones del modelo, se aplicó la prueba del Factor de Inflación de la Varianza (VIF) a las variables explicativas, el cual detecta la presencia de colinealidad, así si dos o más regresores están fuertemente correlacionados entre sí, sus varianzas aumentan y las inferencias sobre sus efectos individuales se vuelven poco precisas. En la práctica, valores de VIF superiores a 5 suelen considerarse indicativos de un problema serio de multicolinealidad.

Tabla 2
Factores de inflación de la varianza (VIF)

Variable	VIF	1/VIF
ICEE_RUR	1.09	0.914
Índice de Complementariedad Económica	2.12	0.471
Índice de Productividad	2.26	0.442
Índice de Seguridad	1.44	0.696
Índice de Competitividad	1.20	0.833
Índice de Gobernanza	1.17	0.856
Índice de Fortaleza Institucional	1.17	0.856
Índice de Tecnología	1.10	0.912
Promedio VIF	**1.44**	

Para este caso, como se observa en la **Tabla *2*** todos los VIF individuales de las covariables se situaron entre 1.09 y 2.26 y el VIF promedio fue 1.44. Estos resultados indican que la colinealidad es mínima, las variables comparten muy poca varianza común y, por tanto, los coeficientes estimados son estables y las pruebas *t* son confiables. Así, se descarta la necesidad de eliminar o transformar variables por multicolinealidad y se respalda la interpretación individual de cada predictor dentro del modelo.

4.2 Especificación del modelo

El modelo de efectos fijos en dos vías (TWFE) parte del planteamiento $y_{it} = X_{it}\beta + c_i + f_t + u_{it}$ donde c_i controla la heterogeneidad invariante entre unidades y f_t los shocks comunes a cada periodo. Wooldridge (2021) muestra que el estimador $\hat{\beta}_{FE}$ se obtiene estimando por OLS una regresión que incluye *dummies* para todas las unidades y todos los periodos, de modo que la variación que identifica a β proviene exclusivamente de los desvíos simultáneos respecto de las medias específica de unidad y de tiempo. TWFE puede interpretarse como un procedimiento que, manteniendo la simplicidad de OLS, elimina simultáneamente la

heterogeneidad inobservable en ambas dimensiones y ofrece una representación parsimoniosa y flexible para paneles balanceados.

El modelo base de efectos fijos en dos vías (TWFE) es el siguiente

$$y_{it} = X_{it}\beta + c_i + f_t + u_{it} \quad (5)$$

$$t = 1, \dots, T; i = 1, \dots, N$$

Por lo tanto, para esta investigación el modelo TWFE implementado, según los datos recopilados, la unidad de análisis, las covariables incorporadas y el periodo de estudio, puede denotarse de la siguiente manera:

$$DIPM_{it} = \alpha + ICEERUR_{it}\beta + X_{it}\gamma_k + c_i + f_t + u_{it} \quad (6)$$

$$X_{it} = Matriz\ de\ covariables$$

$$t = 1, \dots, 6 \ = Años\ desde\ 2015\ hasta\ 2020$$

$$i = 1, \dots, 1122 \ = Municipios\ y\ areas\ no\ municipalizadas$$

$$u_{it} = termino\ de\ error$$

El parámetro central de interés, β, cuantifica la relación promedio entre la cobertura eléctrica rural y el desempeño de la pobreza multidimensional, controlando por todas las características observadas incluidas y por las no observadas que permanecen constantes. El parámetro γ_k hace referencia a la relación de las *k* covariables sobre el $DIPM_{it}$

- El uso de efectos fijos municipales permite eliminar toda influencia de factores permanentes, no observados y específicos de cada municipio (geografía, cultura, historia, etc.), que pudieran sesgar la estimación del impacto de la electrificación rural sobre la pobreza multidimensional.
- Los efectos fijos temporales permiten eliminar influencias comunes a todos los municipios, como políticas macroeconómicas nacionales, crisis económicas o sanitarias y cambios institucionales o regulatorios que afectan simultáneamente a todas las entidades territoriales.

Este modelo busca aislar el efecto neto de la cobertura eléctrica sobre la pobreza, descontando la influencia de las características fijas de cada municipio y de las tendencias generales del tiempo. El modelo TWFE presupone que, una vez controladas las variables observables y los efectos fijos descritos, no existen otras variables omitidas que cambien simultáneamente en el tiempo con la cobertura eléctrica rural y que también incidan directamente en la pobreza multidimensional (OpenAI, 2025).

Es importante destacar que se exploró la factibilidad de tres enfoques adicionales, Regresión Discontinua (RDD), Diferencias en Diferencias (DiD) y Variables Instrumentales (IV), con el fin de contrastar el diseño principal. En RDD, si bien la política pública contempla un umbral en la matriz impacto–esfuerzo, la verificación empírica mostró que la asignación y priorización efectiva de proyectos no obedecen estrictamente a dicho umbral, y las estimaciones locales en torno al punto de corte no evidenciaron discontinuidades estadísticamente significativas en las variables de interés. En DiD, la implementación escalonada del PNER y la heterogeneidad temporal del tratamiento dificultan sostener el supuesto de tendencias paralelas de forma creíble para grupos de tratamiento y control a lo largo del periodo analizado, lo cual limita su pertinencia como diseño principal. Finalmente, en IV se enfrentó la dificultad para identificar una variable instrumental que fuera simultáneamente relevante y válida, por lo que se descartó su aplicación. En consecuencia, la estimación empírica se implementa exclusivamente mediante un modelo TWFE con efectos fijos por municipio y año, complementado con controles y pruebas de robustez internas al marco de efectos fijos.

5 Resultados

Como resultado de lo expuesto anteriormente, el modelo de efectos fijos en dos vías realizado incorporo las variables desempeño del índice de pobreza multidimensional (D_IPM) como la variable dependiente, el índice de cobertura de energía eléctrica rural (ICEE_RUR) como la variable independiente, y las demás covariables del modelo. Se hizo uso del software Stata 15, y por medio de la librería *reghdfe* se procedió a simular el modelo descrito por la ecuación 6. La variable (ICEE_RUR). Ambas variables se encuentran en un rango de 0 a 100 para facilitar su comparación.

En la especificación del modelo se aplica un filtro para aquellos municipios cuya proporción de viviendas rurales con respecto a las viviendas totales sea mayor al 55%, esto obedece a lo observado en la **Tabla *3*** que indica los promedios de la variable RURALIDAD por categorías del DNP, general y por programas de focalización, lo que indica que en su conjunto la media de la variable esta alrededor de 0.55.

Tabla 3
Cálculo del filtro - umbral de la variable RURALIDAD

Categorías	Media RURALIDAD 2015
Ciudades y aglomeraciones	0.2281
Intermedio	0.5271
Rural	0.6487
Rural Disperso	0.7811
ZOMAC_PDET_PNIS	0.5846
General	0.5923
Promedio	**0.5544**

El filtro RURALIDAD > 0,55, reduce la muestra a 705 municipios y 5 periodos, y se justifica porque sitúa el corte justo donde la población rural supera la mitad del total, excluye casi todos los territorios urbano-intermedios y conserva la inmensa mayoría de los propiamente rurales (medias de 0,65 “Rural” y 0,78 “Rural disperso”). Este valor también es cercano al promedio de la variable para municipios que pertenecen a programas PDET, ZOMAC o PNIS que es de 0.58. Esto

permite evaluar la población objetivo del PNER que son municipios rurales con mayor déficit eléctrico, y a su vez mejora el ajuste del modelo TWFE. Adicionalmente se observa en la **Figura *5*** que el filtro es conveniente, debido a que en cada una de las categorías del DNP existen municipios con baja densidad de viviendas rurales, por ejemplo, en las categorías Rural y Rural Disperso existen municipios con RUALIDAD menor a 0.25, lo que indica heterogeneidad de la ruralidad al interior de cada categoría.

Sin embargo, con el filtro RURALIDAD > 0,55 el panel queda desbalanceado. La estimación reporta 705 municipios y 5 periodos de las cuales quedan 4 *dummies* efectivas de año, si el panel fuera balanceado tendríamos 3.525 observaciones, pero el modelo muestra 3.436, 89 observaciones menos, además Stata incluso indicó "dropped 10 singleton observations", señal de unidades después del filtro con solo un año útil que el estimador con efectos fijos no puede aprovechar. Esto implica que algunos municipios después del filtro carecen de datos en uno o más años. Metodológicamente, el TWFE sigue siendo válido porque se estima con toda la variación *within* disponible, sin embargo, es necesario reportar que los resultados se basan en un panel desbalanceado tras el filtrado por el nivel de ruralidad.

Adicionalmente se aplicó la prueba de Wald Modificada que evalúa la hipótesis nula de que la varianza de los residuos es homocedástica de forma grupal entre unidades para todos los municipios, para ello se utilizó el comando *xtreg* y la librería *xttest3*.

La conclusión según el p valor observado en la **Tabla *4*** es que se rechaza la hipótesis nula de homocedasticidad en el panel al 5%, por lo que existe heterocedasticidad por grupos entre unidades en el modelo TWFE estimado. La heterogeneidad territorial en cobertura, costos y soluciones (red, microrred, SSFV) documentada por PIEC y el PNER y la focalización diferencial por municipios que pertenecen a programas PDET, ZOMAC, o PNIS puede generar varianza no constante entre municipios, lo que hace esperable el comportamiento heterocedastico en el panel de datos. Al existir heterocedasticidad, los errores estándar convencionales no son válidos, por tanto, la significancia del coeficiente del índice de cobertura de electrificación rural debe evaluarse con varianzas robustas por panel, asegurando t-estadísticos y p-valores correctos para el efecto de la electrificación rural sobre el desempeño del índice de pobreza multidimensional, por lo tanto, este resultado justifica plenamente el uso de errores estándar robustos *(vce(robust))* en el modelo *TWFE.*

Tabla 4
Resultados de la Prueba de Wald Modificada para Heterocedasticidad

Característica	Valor
Hipótesis Nula (H0)	Homocedasticidad ($\sigma i2=\sigma 2$)
Estadístico $\chi 2$	608082.83
Grados de Libertad	1122
Valor p	0.0000
Decisión (α = 5%)	Se rechaza la H0

Tabla 5
Resultados modelo TWFE

Variable	Coeficiente	Error Estándar	*t*	*p*-valor
ICEE_RUR	0.0265552	0.0121703	2.18	0.029
Índice de Productividad	–0.0547073	0.0700742	–0.78	0.435
Índice Fortaleza Institucional	–0.0120809	0.0239170	–0.51	0.614
Índice de Tecnología	–0.0920472	0.0242858	–3.71	0.000
Índice de Seguridad	0.0749102	0.0176356	4.25	0.000
Índice de Gobernanza	–0.1817040	0.0267858	–6.78	0.000
Índice de Competitividad	–0.0303487	0.0315821	–0.96	0.337
Índice de Complementariedad Económica	0.0125721	0.0631547	0.20	0.842
Constante	58.25317	3.034545	19.20	0.000

Estadístico de ajuste	Valor
Número de observaciones	3 436
Grupos absorbidos	2 HD FE
F(8, 2719)	10.19
Prob > F	0.0000
R-cuadrado total	0.8460
R-cuadrado ajustado	0.8055
R-cuadrado *Within*	0.0296
Root MSE	7.7483

Notas:
• Estimación con efectos fijos absorbidos por municipio y periodo (HDFE).
• Errores estándar robustos dada la heterocedasticidad por grupos.

Inicialmente es interesante observar que el resultado del modelo permite consolidar la validez de la hipótesis principal de que un aumento del índice de cobertura de energía eléctrica rural está asociado con mejores resultados del desempeño del índice de pobreza multidimensional,

con efectos mayores en municipios de alta ruralidad (RURALIDAD>0.55) y complementariedad con capacidades locales según los controles extraídos del ICM.

Asumiendo un nivel de significancia estadística del 5% los resultados del modelo de efectos fijos en dos vías expuestos en la **Tabla *5*** se pueden interpretar de la siguiente manera considerando que la hipótesis nula es la inexistencia de un efecto del ICEE_RUR sobre el D_IPM, y la hipótesis alternativa es aquella que evidencia un efecto diferente de cero.

$$H_0: \hat{\beta}_{TWFE} = 0 \ ; \ H_1: \hat{\beta}_{TWFE} \neq 0 \quad (7)$$

Tabla 6

Interpretación de resultados del modelo TWFE

Variable explicativa	Magnitud	Significancia	Interpretación
ICEE_RUR	**0.0266**	**p = 0,029**	Cada aumento de 1 punto porcentual en la cobertura eléctrica rural (ICEE_RUR) se asocia con un aumento estadísticamente significativo al 95% de 0.0265 puntos de mejora en el D_IPM. Confirma que expandir la electrificación rural contribuye a reducir moderadamente la pobreza multidimensional.
Índice de Productividad	–0,054	No sig.	La productividad municipal, no muestra efecto significativo sobre el D_IPM.
Índice Fortaleza Institucional	–0,012	No sig.	El Índice Fortaleza Institucional municipal no exhibe efecto significativo sobre el D_IPM.
Índice de Tecnología	– 0,092	**p < 0,001**	Un punto adicional de desempeño tecnológico se asocia significativamente con 0,092 puntos de reducción en el D_IPM. Puede reflejar brechas urbano-rurales internas por municipio.
Índice de Seguridad	0,075	**p < 0,001**	Mejor seguridad se vincula significativamente a 0,075 puntos de mejora del D_IPM por cada punto adicional
Índice de Gobernanza	– 0,182	**p < 0,001**	Un mejor puntaje en gobernanza local está asociado, con un ligero empeoramiento del D_IPM. puede reflejar que los municipios donde el D_IPM ya es alto y las mejoras marginales resultan menores.
Índice de Competitividad	–0,030	No sig.	La competitividad económica por municipios no muestra efecto significativo sobre el D_IPM.
Índice de Complementariedad Económica	0,013	No sig.	La complementariedad económica intermunicipal no muestra efecto significativo sobre el D_IPM.

El coeficiente de ICEE_RUR es 0.0266 con error estándar 0.0122, t=2.18 y p=0.029, lo que indica un efecto positivo y estadísticamente significativo al 5% sobre el desempeño del IPM estandarizado. El tamaño del efecto es modesto, pero es coherente con evidencia internacional que

vincula el acceso a electricidad con mejoras en dimensiones de pobreza (vivienda, saneamiento, educación y salud), donde la electricidad actúa como insumo habilitante más que como un shock de gran tamaño inmediato sobre el índice agregado. Dado que ICEE_RUR y D_IPM están en una escala de 0–100, un aumento de 1 punto porcentual en la cobertura eléctrica rural se asocia con un incremento de 0.0266 puntos en el desempeño del IPM. El intervalo de confianza al 95% es de 0.0027 a 0.0504 por cada punto de ICEE_RUR, lo que descarta efectos negativos y respalda un efecto pequeño pero positivo y estadísticamente significativo.

Una vez corregida la inferencia con errores robustos, y habiendo aplicado el filtro de RURALIDAD el coeficiente positivo y significativo de ICEE_RUR respalda la hipótesis principal de que mayores coberturas eléctricas rurales se asocian con mejoras, en el desempeño del IPM municipal, esto es coherente con la evidencia de planificación y focalización del PNER y el PIEC y con la interrelación entre acceso eléctrico y reducción de privaciones múltiples que sustentan las estrategias de universalización. Para maximizar impacto y equidad, la política debe según (Alkire et al., 2021; M. Bernal et al., 2022), focalizar territorios rurales con altas brechas de pobreza multidimensional y energía, asegurar calidad, confiabilidad y reducción de pérdidas, habilitar esquemas de conexión y financiamiento para hogares de baja capacidad de pago y promover usos productivos y articulación intersectorial, recomendaciones que son consistentes con la literatura y están muy relacionados con las directrices expuestas en el PNER y el PIEC.

La modesta magnitud 0.0266 del coeficiente es esperable, según el estudio de World Bank (2008) la electricidad, por sí sola, genera ganancias claras en bienestar (iluminación, uso de TV, tiempo de estudio, seguridad) y reduce costos, pero los saltos mayores en el IPM requieren integrar la expansión de cobertura con mejoras en vivienda, saneamiento, agua segura y usos productivos, reforzando las complementariedades que la literatura documenta. Adicionalmente los hallazgos del modelo TWFE son coherentes con los "canales" propuestos por Khandker et al. (2013) visualizados en la **Figura 1**, es esperable observar mejoras graduales en dimensiones del bienestar que integran el IPM (educación por más horas de estudio, condiciones de vivienda y servicios por el uso de equipos, y salud por mejor iluminación y refrigeración), de modo que el índice agregado mejore aunque con magnitud moderada cuando no hay paquetes complementarios que potencien usos productivos y calidad del servicio.

La magnitud moderada observada en este estudio es probablemente un límite inferior del efecto del ICEE_RUR sobre el D_IPM. El horizonte 2015–2020 captura, ante todo, las fases

iniciales del PNER habilitado por el Decreto 884 de 2017, de modo que solo cuatro años (2017–2020) recogen impactos inducidos por la política. En este marco, y conforme a la evidencia comparada, los impactos de la electrificación se acumulan en el tiempo por lo que pueden existir efectos que difícilmente se capturan en ventanas cortas de tiempo. Además, los cálculos oficiales del ICEE 2019–2022 evidencian que la cobertura continuó ajustándose por nuevas conexiones y por la dinámica de las viviendas rurales, lo que sugiere que incorporar años posteriores permitiría observar retornos acumulativos y, en consecuencia, un coeficiente de mayor magnitud. En suma, los resultados para 2015–2020 deben interpretarse como una estimación conservadora, consistente con una trayectoria de convergencia de mediano plazo bajo la expansión acelerada prevista por el PNER y el PIEC.

La literatura señala que la focalización hacia territorios con mayores brechas energéticas y IPM potencia el retorno social de la inversión y evita que los beneficios se concentren en hogares no pobres o en comunidades con menor costo marginal de extensión. Un coeficiente positivo a nivel municipal sugiere que, en promedio, donde aumentó la cobertura rural, el desempeño en IPM mejoró.

Algunos índices relacionados (seguridad y tecnología) muestran asociaciones significativas, mientras que otros no, lo que sugiere que la electrificación opera junto a factores institucionales y sectoriales. Finalmente, el estadístico F global es significativo y el R2 alto, aunque la varianza *"within"* es limitada, típico en paneles con efectos fijos y variables de lenta evolución.

6 Conclusiones

La investigación válida que la expansión de la cobertura de energía eléctrica rural contribuye de forma estadísticamente significativa a mejorar el desempeño del índice de pobreza multidimensional en municipios rurales de Colombia. Estos resultados confirman la hipótesis de que el acceso a la electricidad funciona como un factor habilitante esencial para mitigar privaciones múltiples, alineándose con el enfoque teórico de que la energía eléctrica es una capacidad fundamental para el desarrollo humano en contextos de pobreza estructural.

La evidencia confirma que la implementación del PNER redujo la pobreza multidimensional, aunque su magnitud es modesta. Este resultado es coherente con que la electrificación es condición necesaria pero no suficiente para mejorar dimensiones como educación, ingresos o salud. La conversión de electricidad en mejoras concretas del IPM depende de factores estructurales que condicionan el impacto. La literatura internacional respalda esta interpretación, los estudios en Vietnam documentan efectos sustanciales en contextos con políticas complementarias, mientras que la evaluación en Ruanda y Kenia encuentran impactos modestos en ingresos y educación cuando se controla heterogeneidad regional. El caso colombiano sugiere que sin inversiones paralelas que mejoren las condiciones para convertir electricidad en oportunidades productivas, el efecto sobre pobreza multidimensional permanecerá significativo pero acotado o en el peor caso inalterado, lo que valida la construcción de los diferentes Planes nacionales de la RRI y resalta la importancia de su efectivo cumplimiento.

La electrificación rural mejora el desempeño del IPM, pero los resultados sugieren que su efecto agregado es incremental y depende de la calidad de servicio, la continuidad en horas de servicio, la robustez de la red y la integración de políticas complementarias, por ello, la universalización efectiva exige inversiones sostenidas, una estrategia de focalización efectiva y una estrategia de desarrollo rural que integre energía con otras dimensiones del bienestar.

Los resultados sugieren que el acceso a electricidad potencia no solo las condiciones materiales de vida, sino también la capacidad de los hogares rurales de apropiar servicios fundamentales en educación, salud y productividad, siendo un catalizador para intervenciones complementarias en otras dimensiones del IPM. Mayores avances en el desempeño del índice de pobreza multidimensional requiere acciones articuladas, así pues, la electrificación debe vincularse

también con mejoras en vivienda, saneamiento, fortalecimiento institucional y fomento de capacidades productivas para lograr cambios más profundos y sostenibles.

El caso de Chocó es interesante ya que ilustra una paradoja crítica de alta cobertura eléctrica rural (87,4%) que coexiste con un desempeño en pobreza multidimensional bajo D_IPM de (34,79). Este contraste evidencia que la conexión física es insuficiente para reducir privaciones cuando la calidad del servicio es deficiente, factores como interrupciones frecuentes, baja asequibilidad, dispersión poblacional y debilidad institucional amortiguan los retornos de la cobertura. La política debe evolucionar hacia un enfoque que garantice acceso, calidad, continuidad, asequibilidad, con indicadores centrados en horas efectivas de servicio y apropiación productiva.

Finalmente, los hallazgos refuerzan la relevancia de mantener políticas públicas focalizadas en los territorios con mayores brechas energéticas y de pobreza multidimensional, lo que evidencia que es acertada la estrategia de priorización hacia los municipios categorizados en programas PDET, PNIS y ZOMAC, y resalta la importancia de su efectivo cumplimiento y supervisión, poniendo en contexto no solo la cobertura sino la calidad, continuidad, fiabilidad y el fortalecimiento del aprovechamiento productivo del servicio eléctrico rural como eje estratégico para cerrar las brechas de desigualdad en Colombia.

En suma, el resultado empírico refuerza el criterio de mantener a la electrificación rural como palanca estratégica dentro de una agenda integral de reducción de pobreza multidimensional, su contribución directa es modesta pero robusta, y su efecto total se amplifica cuando se integra a un paquete territorial de bienes públicos, infraestructura y capacidades que atacan las privaciones concurrentes más frecuentes entre los hogares sin electricidad.

Los hallazgos de esta investigación revelan una lección fundamental para la política pública colombiana, el impacto de la electrificación rural sobre la pobreza multidimensional, aunque positivo y estadísticamente significativo, no alcanzará su potencial transformador sin la implementación efectiva y coordinada de los 16 Planes Nacionales Sectoriales que componen la Reforma Rural Integral (RRI). La evidencia empírica demuestra que la electricidad actúa como un catalizador, pero su capacidad de generar desarrollo integral depende críticamente de la existencia simultánea de infraestructura vial, servicios de salud y educación de calidad, acceso a agua potable y saneamiento, vivienda digna y oportunidades productivas. Por tanto, esta investigación confirma la urgencia de fortalecer los mecanismos de coordinación intersectorial liderados por la Agencia de Renovación del Territorio (ART), sincronizar temporalmente las inversiones sectoriales en los

territorios priorizados, y desarrollar sistemas de monitoreo y evaluación que midan el impacto agregado sobre el IPM resultante de la acción conjunta de todos los planes.

Futuras investigaciones deberían explorar mecanismos de impacto mediante métodos de identificación alternativos como el de diferencias en diferencias *DiD* con tratamiento escalonado o variables instrumentales *IV*, e incorporar datos técnicos de capacidad instalada, horas al día de servicio, flujos de potencia, curvas de consumo energético por municipio, entre otras para refinar la precisión de la variable de tratamiento, fortaleciendo así la robustez de la estimación y los supuestos de independencia inherentes al modelo utilizado.

Referencias

Almeshqab, F., & Ustun, T. S. (2019). Lessons learned from rural electrification initiatives in developing countries: Insights for technical, social, financial and public policy aspects. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 102, pp. 35–53). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.035

Alphabet. (2025). *Gemini [Large Language Model]* (Deep Research 2025).

Bensch, G., Kluve, J., & Peters, J. (2011). Impacts of rural electrification in Rwanda. *Journal of Development Effectiveness*, *3*(4), 567–588. https://doi.org/10.1080/19439342.2011.621025

Bernal, M., Lancheros, P., Reyes, K., Sánchez, J., & Villegas, S. (2022). *INFORME SOBRE POBREZA ENERGÉTICA MULTIDIMENSIONAL EN COLOMBIA*. https://bit.ly/4mRK3d6

Bernal, R., & Peña, X. (2011). *Guía práctica para la evaluación de impacto*.

Colombia. Congreso de la República. (1994). *Ley 142 de 1994 Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.* https://bit.ly/4mq3fyG

Colombia. Congreso de la República. (1994). *Ley 143 de 1994 Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, trasmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.* http://bit.ly/3JJkPPF

Colombia. Congreso de la República. (2014). *Ley 1715 Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.* Diario Oficial No. 49.150. https://bit.ly/4mRKeoM

Colombia. Congreso de la República. (2021). *Ley 2099 de 2021 Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, se dinamiza el mercado energético, se reactiva el mercado del carbono y se dictan otras disposiciones.* https://bit.ly/4oMBx0O

Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2014). *METODOLOGÍA ÍNDICE DE POBREZA MULTIDIMENSIONAL (IPM)*.

Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2021). *Boletín Técnico Pobreza Multidimensional en Colombia 2020*.

Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2025). *DEMOGRAFÍA RURAL EN COLOMBIA*.

Colombia. Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2023). *Documento Técnico Índice de Ciudades Modernas (ICM) 2023*.

Colombia. Ministerio de Minas y Energía [MME]. (2018). *PLAN NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN RURAL [PNER] 2018-2031*. https://bit.ly/3H5Nrlu

Colombia. Ministerio de Minas y Energía [MME]. (2023). *PLAN NACIONAL DE ELECTRIFICACIÓN RURAL 2023*. https://bit.ly/41gzrfh

Colombia. Presidencia de la República. (2016). *Decreto 884 de 2017 Por el cual se expiden normas tendientes a la implementación del Plan Nacional de Electrificación Rural en el marco del Acuerdo Final para la Terminación del Conflicto y la Construcción de una Paz Estable y Duradera*. https://bit.ly/4lw0vyt

Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2018a). *DOCUMENTO METODOLÓGICO DE CÁLCULO DEL ÍNDICE DE COBERTURA DE ENERGÍA ELÉCTRICA*. http://bit.ly/4lDrIzy

Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2018b). *ZONAS NO INTERCONECTADAS-ZNI DIAGNÓSTICO DE LA PRESTACIÓN DEL SERVICIO DE ENERGÍA ELÉCTRICA 2018*.

Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2019). *Plan Indicativo de Expansión de Cobertura de Energía Eléctrica [PIEC] 2019 - 2023*. https://bit.ly/45t9vzz

Colombia. Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2024). *Boletín Técnico Calculo del Índice de Cobertura de Energía Eléctrica 2019-2020*. http://bit.ly/4fPEBFi

Garcés, E. (2021). *Alternativas de gestión para el suministro eléctrico sostenible en Zonas No Interconectadas* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia]. http://bit.ly/3JJw1vF

Groth, A. (2020). Overcoming one-way impact evaluation of rural electrification projects. *International Journal of Energy Economics and Policy*, *10*(2), 464–476. https://doi.org/10.32479/ijeep.8941

Guzman, E., España, L., & Gomez, L. (2023). *Energía social y transición energética en Colombia*. http://bit.ly/45vuwKk

Karumba, M., & Muchapondwa, E. (2018). The impact of microhydroelectricity on household welfare indicators. *Energy Efficiency*, *11*(3), 663–681. https://doi.org/10.1007/s12053-017-9590-8

Khandker, S., Barnes, D., & Samad, H. (2013). Welfare impacts of rural electrification: A panel data analysis from Vietnam. *Economic Development and Cultural Change*, *61*(3), 659–692. https://doi.org/10.1086/669262

OpenAI. (2025). *ChatGPT [Large language model]*. ((versión gpt-4o, 20 jul.)). https://chat.openai.com/chat

Alkire, S., Kanagaratham, U., & Vollmer, F. (2021). *Interlinkages Between Multidimensional Poverty and Electricity: A study using the global Multidimensional Poverty Index (MPI)*. http://bit.ly/4oSy68X

Rosado, B., Lancheros, V., Mosquera, K., Molina, F., Garavito, P., & Villegas, S. (2025). *INFORME SOBRE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS PAÍSES DE LA CELAC*. http://bit.ly/3HKhT4K

Torres, D. (2015). *Análisis de la fórmula de asignación de recursos para electrificación rural en Colombia* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. http://bit.ly/4fV52cQ

Wooldridge, J. M. (2021). *Two-Way Fixed Effects, the Two-Way Mundlak Regression, and Difference-in-Differences Estimators Difference-in-Differences with Panel Data View project Two-Way Fixed Effects, the Two-Way Mundlak Regression, and Difference-in-Differences Estimators*. http://bit.ly/4mMcmJS

World Bank. (2008). *The Welfare Impact of Rural Electrification: A Reassessment of the Costs and Benefits*. WORLD BANK INDEPENDENT EVALUATION GROUP. https://doi.org/10.1596/978-0-8213-7367-5