

**Revista Científica General José María Córdova**  
(Revista Colombiana de Estudios Militares y Estratégicos)  
Bogotá D.C., Colombia  
ISSN 1900-6586 (impreso), 2500-7645 (en línea)  
**Web oficial:** <https://www.revistacientificaesmic.com>

## Pobreza multidimensional y energética, seguridad y robustez de la red eléctrica colombiana: un análisis de su correlación

Multidimensional and energy poverty, security and robustness of the Colombian electrical grid: An analysis of their correlation

**Andrea Franco Correa** 

United Nations University, Maastricht, Países Bajos  
[afrancocorrea@cris.unu.edu](mailto:afrancocorrea@cris.unu.edu)

**Gabriel Villalobos Camargo** 

Escuela Superior de Administración Pública, Bogotá D.C., Colombia  
[gabriel.villalobos@esap.edu.co](mailto:gabriel.villalobos@esap.edu.co)

**Citación APA:** Franco Correa, A., & Villalobos Camargo, G. (2024). Pobreza multidimensional y energética, seguridad y robustez de la red eléctrica colombiana: un análisis de su correlación. *Revista Científica General José María Córdova*, 22(47), 621-644.  
<https://doi.org/10.21830/19006586.1371>



**Publicado en línea:** 30 de septiembre de 2024



**Enviar un artículo a la Revista**

**Responsabilidad de contenidos:** La responsabilidad por el contenido de los artículos publicados por la Revista Científica General José María Córdova (Revista Colombiana de Estudios Militares y Estratégicos) corresponde exclusivamente a los autores. Las posturas y aseveraciones presentadas son resultado de un ejercicio académico e investigativo que no representa la posición oficial ni institucional de la Escuela Militar de Cadetes “General José María Córdova”, el Ejército Nacional, las Fuerzas Militares de Colombia o el Ministerio de Defensa Nacional.



Los artículos publicados por el Sello Editorial ESMIC y la Revista Científica General José María Córdova (Revista Colombiana de Estudios Militares y Estratégicos) son de acceso abierto bajo una licencia Creative Commons: **Atribución - No Comercial - Sin Derivados**.



**Revista Científica General José María Córdova**  
(Revista Colombiana de Estudios Militares y Estratégicos)  
Bogotá D.C., Colombia

Volumen 22 número 47, julio-septiembre 2024, pp. 621-644  
<https://doi.org/10.21830/19006586.1371>

## Pobreza multidimensional y energética, seguridad y robustez de la red eléctrica colombiana: un análisis de su correlación

Multidimensional and energy poverty, security and robustness of the Colombian electrical grid: An analysis of their correlation

**Andrea Franco Correa** 

United Nations University, Maastricht, Países Bajos

**Gabriel Villalobos Camargo** 

Escuela Superior de Administración Pública, Bogotá D.C., Colombia

**RESUMEN.** Este trabajo analiza la relación existente entre medidas de pobreza y la robustez de la red eléctrica colombiana, en el contexto de la seguridad. Para hacerlo, se construyó un tablero de indicadores que permitió triangular la metodología de los índices multidimensionales de pobreza con los modelos de redes. Como conclusión, se encontró una gran fragilidad de la red eléctrica, representada por el bajo número de nodos asociados a los departamentos de Colombia. La robustez de la red nacional es de 0,0816, un valor bajo comparado con los valores típicos de redes no optimizadas. Se encontró también una relación inversa entre la tasa de homicidios y las medidas de pobreza, incluida la pobreza energética. Asimismo, se halló una correlación alta (0,94) entre la pobreza multidimensional y la pobreza energética en Colombia.

**PALABRAS CLAVE:** análisis de redes; electricidad; pobreza energética; pobreza multidimensional; seguridad

**ABSTRACT.** This article analyses the relationship between poverty measures and the robustness of the Colombian electricity grid in the context of security. To do so, a dashboard was built that allowed triangulating the methodology of multidimensional poverty indices with network models. In conclusion, the electricity grid was highly fragile, as shown by the low number of nodes associated with the departments of Colombia. The robustness of the national grid is 0.0816, a low value compared to the typical values of non-optimized networks. An inverse relationship was also found between the homicide rate and poverty measures, including energy poverty. Likewise, a high correlation (0.94) was found between Colombia's multidimensional poverty and energy poverty.

**KEYWORDS:** electricity; energy poverty; grid analysis; multidimensional poverty; security

Sección: DOSIER • Artículo de investigación científica y tecnológica

Recibido: 18 de julio de 2024 • Aceptado: 20 de septiembre de 2024

**CONTACTO:** Andrea Franco Correa  [afrancocorrea@cris.unu.edu](mailto:afrancocorrea@cris.unu.edu)

## Introducción

El acceso, la confianza y la resiliencia de la infraestructura energética es crucial para enfrentar las desigualdades políticas, económicas y sociales de los países (Amin, 2008). La disponibilidad de energía es fundamental para garantizar el cierre de brechas en desarrollo humano, en particular en países con altos niveles de pobreza y desigualdad, hasta el punto de ser considerada una de las metas de la Agenda 2030 (PNUD, 2015).

La pobreza energética afecta de manera desproporcionada a países y regiones caracterizadas por niveles bajos y medios de desarrollo. Según Guzowski et al. (2021, p. 2): “1300 millones de personas en el mundo (17%) no tienen acceso a la electricidad y 2700 millones (36%) dependen del uso de la biomasa para cocinar”. De ahí que la seguridad energética, en cuanto dimensión de procesos de transición y reconversión, sea fundamental para los procesos de seguridad humana y justicia social.

Una de las características relacionadas con la seguridad del sistema de interconexión eléctrica es su robustez, entendida como la habilidad de mantener su eficiencia ante fallos tanto en las líneas de transmisión como en la infraestructura de generación. En el caso particular de Colombia, con una historia reciente de conflicto armado, la infraestructura eléctrica ha sido siempre considerada objetivo militar. Según el Centro Nacional de Memoria Histórica (2024), entre 1988 y 2012, del total de daños a bienes civiles reportados (5137), 489 correspondieron a infraestructura eléctrica (cerca del 10%). Esta situación ha originado una debilidad de la infraestructura para suplir las necesidades de poblaciones alejadas y vulnerables, lo que ha dado paso a procesos cada vez más profundos de desigualdad y falta de oportunidades.

En la literatura sobre redes complejas, se han propuesto metodologías para cuantificar la robustez de una red (Louzada et al., 2015; Schneider et al. 2013). En este artículo, se propone una metodología que relacione medidas de resiliencia de la infraestructura energética con los diferentes indicadores de pobreza energética, pobreza multidimensional e indicadores de violencia. Este esfuerzo implica la construcción de un tablero de indicadores diversos y la aplicación de medidas de resiliencia de infraestructura de generación energética, de forma tal que se pueda determinar el nivel de confianza, resiliencia y su relación con la pobreza y la desigualdad.

Este artículo espera contribuir, a partir de métodos cuantitativos, a informar la toma de decisiones relacionadas, no solo con la geometría de la red, sino, además, con sus debilidades en términos de seguridad y desigualdad, y todo ello en el marco de políticas públicas relacionadas con procesos de transición energética.

## Marco teórico y conceptual

### La pobreza energética: una aproximación conceptual

A partir de una revisión sistemática de la literatura, mediante motores de búsqueda y usando la ecuación booleana “energy poverty”, se encontraron un total de 2247 artículos en el periodo comprendido entre 2003 y 2024. Como ordenador central, la pobreza energética adquiere importancia en las publicaciones referenciadas a partir de 2020, concentrando un poco más del 70% de la generación de nuevo conocimiento. Haciendo uso del índice H, que señala las publicaciones más citadas e importantes en el campo del conocimiento, se seleccionaron cien artículos, de los cuales, a continuación, se presenta un marco analítico y conceptual para dar cuenta del estado de la literatura sobre el tema.

El concepto de *pobreza energética en los hogares*, se relaciona con la disponibilidad de energía, tanto en función de su uso como en términos de su acceso. Como concepto, no solo hace referencia a contar con infraestructura adecuada, sino, además, a aspectos como recursos económicos, educación, salud y equidad social (Pachauri & Spreng, 2004). No hay aún una definición única de lo que puede entenderse como pobreza energética, y usualmente se confunde con la pobreza debida a carencia de combustibles. Las definiciones intentan aproximarse a fenómenos de correlación con otras variables, como, por ejemplo, las brechas de género, o la falta de redes eléctricas para suministrar el servicio en zonas rurales.

La forma como los hogares experimentan la pobreza energética depende del contexto y de la zona geográfica de influencia. Además, se experimenta de manera diferente a lo largo del tiempo y el espacio (Kitchen & O'Reilly, 2016). Esto significa que existen dos formas de aproximarse a una definición de *pobreza energética*: la pobreza debida a carencia de combustibles y la pobreza energética por acceso. Es importante señalar que, conceptualmente, es diferente la forma de aproximarse a su medición: puede ser a través de indicadores que se aproximan a la *pobreza monetaria* (ingresos, consumo o gasto) o a la *pobreza multidimensional* (diferentes indicadores que se asemejan al concepto de *bienestar*).

Existe una extensa literatura que describe las características de los hogares de diferentes países en términos de energía. En el caso de Australia, por ejemplo, Chester y Morris (2016) analizan los efectos de los costos de energía en el ingreso disponible de los hogares más pobres y vulnerables desde una perspectiva de pobreza por ingresos.

Para el caso de países desarrollados, de manera mayoritaria la literatura señala un aspecto que no necesariamente aplica a países tropicales, y es el acceso a fuentes energéticas que garantizan, durante las estaciones, calefacción o aire acondicionado, como es el caso de Estados Unidos (Harrison & Popke, 2011), Grecia (Katsoulakos, 2011), Ucrania (Petrova et al., 2013), entre otros. Sin embargo, dadas las características de Colombia, no se considerará la pobreza energética en términos térmicos.

De igual manera, este artículo se distancia del concepto de *pobreza debida a carencia de combustibles (fuel poverty)*, que concentra también su campo de acción en países

desarrollados, y se relaciona directamente con el acceso a calefacción, estacionalidades de gastos que impactan el ingreso disponible de los hogares, dependencia de adultos mayores para arreglos individuales de vivienda o de hogares con niños, niñas y adolescentes, formas de generación tradicional de energía y estado de las viviendas para hacer uso eficiente de esta, entre otros aspectos (Bartiaux et al, 2015; Liddell, 2009; Walker, 2008; Clinch, 2004; Lawlor, 2001; Healy & Clinch, 2004; Campbell, 1993).

La razón de esta decisión es que, en países donde las estaciones no tienen marcadas diferencias, es decir, en los países localizados geográficamente alrededor de la línea del Ecuador, no existe el riesgo asociado al acceso, uso y costo de combustibles requeridos para garantizar condiciones mínimas de control de temperatura en los hogares, como es el caso de Colombia.

Por el contrario, la definición empleada en este artículo se relaciona con el *acceso a la electricidad* (pobreza energética por acceso) y se basa en un acervo de literatura concentrado, en este sentido, en países de África, Asia y América Latina y el Caribe. Entre el año 2000 y 2021, el acceso a electricidad en los mercados emergentes y economías en desarrollo se ha incrementado en un 25 %, al pasar del 65,7% al 82,3 % (Banco Mundial, 2024a), lo que representa cerca de mil millones de personas que no cuentan con acceso a electricidad. Y es precisamente ese millardo de personas el que acude a otras fuentes de energía que afectan otros aspectos de sus vidas. Por esa razón, además, la aproximación que se adopta en este artículo es de carácter multidimensional.

La pobreza energética lleva a que los hogares busquen fuentes alternativas de energía para suplir sus necesidades, como la madera, el carbón, el kerosene y otros elementos para cocinar en sus hogares. Y esto en viviendas que no necesariamente cuentan con la ventilación adecuada ni con los espacios hechos de materiales de construcción apropiados que permitan su uso de manera saludable y segura. En particular, varios estudios han concentrado sus análisis en los efectos que la pobreza energética tiene sobre la salud de los más vulnerables (niños, niñas, adolescentes y adultos mayores) (Romanello et al., 2021; Sagar, 2005) o en las cargas de tareas del cuidado que recaen sobre las mujeres en cuanto a sus responsabilidades para proveer energía (Clancy et al., 2007). De ahí también que la noción adoptada en este artículo se conciba desde la perspectiva multidimensional.

En el contexto colombiano, la debilidad de la infraestructura eléctrica revela otra arista del problema y es la relacionada con el conflicto armado. La infraestructura eléctrica es vital tanto en términos sociales como económicos: es estratégica para el funcionamiento de las sociedades y, por eso mismo, es lamentablemente un blanco apetecido desde el punto de vista militar (Ackerman et al., 2007; Giroux et al., 2013). De ahí que, en los años de mayor profundización del conflicto armado en Colombia, la infraestructura eléctrica fue objetivo militar de los grupos armados al margen de la ley: recibió el mayor número de ataques en contra, siendo solo superada por los ataques contra oleoductos. Esta situación es uno de los factores determinantes de la actual debilidad en términos de interconexión eléctrica (Lordan-Perret et al., 2019).

De hecho, esta es una de las razones de que los datos abiertos, sobre características y nodos de la red eléctrica colombiana, que se han usado como parte de las mediciones que se presentan en este artículo no cuenten con información actualizada.

Un efecto positivo del “Acuerdo final para la terminación del conflicto y la construcción de una paz estable y duradera”, firmado entre el Gobierno de Colombia y las Fuerzas Armadas Revolucionarias de Colombia - Ejército del Pueblo, fue la reducción del número de ataques a la infraestructura eléctrica (torres de energía) desde la fase misma de negociación, de acuerdo con las cifras de ataques a torres eléctricas del Ministerio de Defensa Nacional (2024).

Otro aspecto que cabe resaltar es la relación entre acceso a infraestructura eléctrica suficiente y la tasa de homicidios. Esta relación explora otro aspecto del eje de seguridad. La pobreza refuerza la sensación de inseguridad en los entornos en los que transcurren las vidas de las personas. El acceso a infraestructura adecuada es fundamental para garantizar entornos protectores, es decir, aquellos en los que las personas se sienten seguras para movilizarse y desarrollar su vida libremente. La correlación entre seguridad, medida en términos de reducción del crimen (robos, asaltos, vandalismo), y la disponibilidad de alumbrado público, principalmente en áreas urbanas, ha sido estudiada en diferentes contextos, desde los artículos seminales de Becker (1968) o Inskeep y Gof (1974) hasta los estudios más recientes sobre los efectos de programas para garantizar alumbrado público en países como Brasil (Arvate et al., 2017) o la reducción de crímenes de acuerdo con las horas de luz natural disponibles (Tealde, 2022).

## **Medición de pobreza energética a través de indicadores multidimensionales**

Dado que la definición conceptual de pobreza energética es difícil, la literatura sobre métodos de medición también refleja diferentes perspectivas. Sin una propuesta de medición, los marcos conceptuales no son más que definiciones abstractas de problemas, y sin un marco conceptual, las mediciones son solo fragmentos de información sin un objetivo claro (Franco-Correa, 2016).

Los hogares, los negocios y las personas en general no consumen energía como un fin en sí mismo, sino como un medio para otros fines. Cada aspecto de la vida de los hogares y de las empresas en el sector productivo está mediado por recursos energéticos. Por ejemplo, un hogar requiere de acceso al agua, que en principio no debería depender necesariamente de recursos energéticos. Sin embargo, en muchos hogares se requiere la interconexión a la red eléctrica u otras fuentes generadoras, como las plantas eléctricas basadas en diésel, para lograr el acceso del servicio de agua a las zonas localizadas en las partes altas de montañas o en edificios con más de una planta, pues para su acceso se requiere de una motobomba (Culver, 2017).

Diferentes servicios a los que se accede gracias a la electricidad no son, además, sustitutos perfectos. No da lo mismo usar la electricidad para iluminar el hogar en la noche que,

por ejemplo, para calentar los alimentos. En esencia, no existe una canasta única de servicios que requieren acceso a electricidad que se pueda usar para definir, de manera análoga a la pobreza monetaria, una canasta básica de estos servicios y contabilizar los recursos financieros necesarios en un hogar para suplir la necesidad mínima. En otras palabras, la medición y, por ende, la definición de lo que es o no pobreza energética depende decisivamente del contexto (Ravallion, 2010; Sen, 1999).

En este sentido, se alinea con los enfoques de pobreza multidimensional, que heredan el concepto de *capacidades* de Sen (1988): “la gente valora su capacidad para hacer ciertas cosas y lograr ciertos tipos de libertades (tales como estar bien nutrido, estar libre de enfermedades prevenibles, tener la libertad para moverse libremente, y así sucesivamente)” (p. 15; trad. propia). En este enfoque, la pobreza se concibe como una “privación de capacidades, más que como una carencia de ingresos” (Sen, 1999, p. 20; trad. propia).

De acuerdo con Culver (2017), existen cuatro aproximaciones para medir la pobreza energética: 1) acceso a recursos energéticos; 2) insumos energéticos; 3) resultados de la pobreza energética; y 4) calidad de la energía usada en los hogares y establecimientos del sector productivo. Cada una de estas aproximaciones tiene ventajas en términos de los indicadores a los que se puede acceder y desventajas basadas en los supuestos detrás de las mediciones.

Mirza y Szirmai (2010) proponen un indicador de pobreza energética que incluye indicadores asociados a la inconveniencia del uso de energía por parte de los hogares rurales en Pakistán. La inconveniencia es medida usando diferentes dimensiones, según la fuente energética identificada. Es una primera aproximación al uso de indicadores compuestos para la medición de pobreza energética.

En la literatura, se reconoce que la pobreza energética es intrínsecamente multidimensional y, en ese sentido, que su medición es compleja. Al emplear, por tanto, indicadores compuestos para medir la pobreza energética, se espera identificar la relación entre los servicios de energía a los que acceden los hogares y los componentes de desarrollo humano con los que se encuentran relacionados. En este sentido, se busca cuantificar la privación energética, como situación opuesta al acceso.

La propuesta de Nussbaumer et al. (2012) incluye dimensiones como insumos para cocinar, acceso a electricidad, electrodomésticos en el hogar y medios de comunicación. La medición de indicadores compuestos propuesta por estos autores incorpora decisiones de carácter normativo, como definiciones de pesos de las variables, puntos de corte y otras ampliamente discutidas y criticadas (Ravallion, 2011) sobre las que se hará referencia más adelante.

Colombia tiene una larga experiencia en la construcción de índices multidimensionales de pobreza. De ahí que en el país ya se han desarrollado propuestas para medir la privación energética de carácter multidimensional usando la metodología propuesta por Nussbaumer et al. (2012). Así, Pérez (2019) diseñó el Índice de Pobreza Energética Multidimensional

(IPEM), que mide cinco dimensiones: 1) combustible para cocinar; 2) acceso a electricidad; 3) servicios derivados de las tecnologías (electrodomésticos); 4) tecnologías de entretenimiento; y 5) medios de telecomunicaciones.

Más recientemente, Promigas (2023) propuso el Índice Multidimensional de Pobreza Energética (IMPE) usando como unidad de análisis el hogar, para identificar el acceso a fuentes de energía adecuada y de calidad. Para ello, emplea cuatro dimensiones: 1) acceso y calidad de la energía; 2) vivienda funcional y liberadora de tiempo; 3) aprender a comunicarse; y 4) territorio equipado para el bienestar.

El IPEM y el IMPE están basados en la metodología de Alkire y Foster (2011), que, para el caso de la pobreza multidimensional, estima unos pesos y se los asigna a cada uno de los indicadores, y este es el *primer punto de corte*, y, luego de la agregación de estos resultados, determina si un hogar es o no pobre en sentido multidimensional, de acuerdo con el *segundo punto de corte*, que es definido arbitrariamente.

## Modelos de redes

El modelado mediante redes, o ciencia de redes, tomó forma después de los trabajos de Barabási y Albert (1999) y Watts y Strogatz (1998). Esta disciplina tiene raíces en los modelos matemáticos de teoría de grafos, que se remontan al trabajo de Euler sobre los siete puentes de Königsberg. Hoy, la representación y el análisis de los modelos de redes se hace mediante la construcción de modelos computacionales. En este caso, el *software* y los algoritmos permiten implementar los modelos de redes y las diferentes medidas de las características de la red. (A estos efectos, en este estudio se usó la librería NetworkX (Hagberg & Conway, 2020), del lenguaje de programación Python, la cual es ampliamente usada y reconocida en la literatura).

Una red consiste en un conjunto de nodos y un conjunto de enlaces que conectan dichos nodos, como lo explica Sayama (2015). La componente conectada de una red es una subgráfica de una red en la que todos los nodos están conectados. Dado que puede haber diferentes componentes conectadas, se puede identificar la más grande como aquella que tiene el mayor número de nodos<sup>1</sup>.

## Métodos y fuentes de datos

Para desarrollar el análisis y el modelo aquí propuesto, se triangularon diversas fuentes de información y metodologías con la finalidad de contar con un tablero de indicadores que den cuenta de cuatro dimensiones: 1) la infraestructura eléctrica del país; 2) la medición de pobreza energética; 3) los datos oficiales de pobreza multidimensional del país; y 4) los indicadores de tasas de homicidios como una variable *proxy* de violencia. A continuación,

---

1 Para profundizar en los conceptos relacionados con la ciencia de redes, véase Sayama (2015).

se describen los métodos y las fuentes de datos empleadas. En general, las dimensiones de análisis identificadas pretenden conectar dos momentos de la cadena: transmisión y uso de electricidad en los hogares.

## Estructura y modelo de la red eléctrica

La información geográfica sobre la localización de la red de transmisión eléctrica colombiana se obtuvo principalmente de dos fuentes secundarias. Por un lado, el “Plan de expansión de referencia: generación-transmisión, 2009-2023”, del Ministerio de Minas y Energía (MinMinas, 2009). Por otro lado, las coordenadas específicas de los puntos de la red se corroboraron con el mapa publicado por ESRI (2010), que cita como fuentes primarias documentos del DNP a los que no fue posible tener acceso.

De ESRI (2010) se extrajo, pues, la información correspondiente a las coordenadas de los puntos extremos de la red eléctrica, en formato de texto. Con dicha información, se construyó un modelo georreferenciado en el *software* QGIS. La información así obtenida incluyó el trazo georreferenciado de las redes de transmisión eléctrica, según la digitalización realizada en esta fuente secundaria.

Como es común en los trabajos de ciencia de datos, el análisis y modelación de datos reales requiere una primera etapa de revisión de la calidad de los datos y de preprocesamiento. El objetivo de esta etapa es garantizar la calidad y coherencia de la información y organizarla de manera jerárquica con miras de desarrollar el posterior análisis de modelado o minería de datos.

En este caso particular, el preprocesamiento incluyó cuatro casos: 1) los nodos que son reportados en diferentes regiones, pero que realmente son idénticos en cuanto a sus coordenadas; 2) los nodos que tienen coordenadas diferentes, pero que son los mismos en cuanto a sus nombres; 3) los nodos que corresponden a una misma región geográfica (generalmente una ciudad); y, finalmente, 4) las secciones en las cuales hay separaciones en la red que no corresponden a la realidad. A continuación, se explican brevemente cada uno de estos casos.

En el primer caso, se hizo un apareamiento entre los nodos que aparecen reportados en diferentes líneas, pero que tienen coordenadas idénticas. El modelo trata esos nodos como idénticos. En el segundo caso, se identificaron nodos que tienen coordenadas diferentes, pero muy cercanas, cuyos nombres son idénticos, aunque estén en diferentes líneas, y que corresponden a estructuras de la red claramente establecidas. Entre ellos se cuentan hidroeléctricas. Para el análisis del modelo de la red eléctrica se modeló una conexión entre dichos nodos.

En el tercer caso, se identificaron nodos que tienen coordenadas diferentes, pero para los cuales hay una región geográfica claramente establecida. Por ejemplo, se tiene el caso de la ciudad de Bogotá, ciudad para la cual las redes eléctricas terminan en diferentes puntos a lo largo de su extensión geográfica. Ahora bien, es claro que internamente existen redes de

transmisión eléctrica en la ciudad, lo que hace que estos nodos no estén realmente aislados. Aquí, el modelo incluyó enlaces entre los diferentes nodos que se encuentran en las regiones geográficas claramente establecidas.

En el último caso, el de las redes eléctricas para las cuales la digitalización del trazo estaba construida por diferentes conjuntos de puntos, se contrastó la continuidad de la red con el “Plan de expansión de referencia: generación-transmisión” y, al corroborar la continuidad de la red, se añadió un enlace entre los nodos correspondientes a las dos secciones de la línea de transmisión.

Los datos obtenidos del proceso de preprocesamiento identificaron las coordenadas de los nodos de la red eléctrica. Sin embargo, en el modelo, no se distingue entre tipos de nodos, lo que en principio podría generar una red bipartita. Y estos nodos están conectados mediante las líneas de transmisión existentes. No obstante, tampoco se tendrá en cuenta la orientación de los enlaces, es decir, se tratarán como conexiones simétricas.

Una vez se construyó el modelo completo de la red eléctrica colombiana, se procedió a construir las subredes que corresponden a las diferentes regiones geográficas (departamentos y Bogotá). En este caso, las subredes que se obtienen no están necesariamente conectadas por completo (véase la Figura 7).

## Pobreza energética

Para analizar el uso de fuentes de electricidad en los hogares, se emplearon los datos de pobreza multidimensional publicados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2024b), a partir del procesamiento oficial del indicador con base en los datos de la Encuesta de Calidad de Vida 2023. En este caso, se toma el valor final del Índice de Pobreza Multidimensional, de acuerdo con la metodología validada por la Misión de Expertos en Pobreza (DANE, 2014) y que se basa en lo planteado por Alkire y Foster (2011).

No se emplea el IMPE, propuesto por Promigas (2023), debido a que la aproximación a la dimensión de equipamientos territoriales dista mucho de una unidad de análisis individual; y lo mismo ocurre con el indicador de acceso de energía adecuado de carácter municipal, que, en el modelo aquí desarrollado, se mide a través de la triangulación con la infraestructura energética. El resto de indicadores son similares a los empleados en la propuesta desarrollada para Colombia por Pérez (2019).

En cuanto al IPPEM, de Nussbaumer et al. (2012) y Pérez (2019), este se calcula a partir de los datos de la Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2023 (DANE, 2024a) introduciendo tres modificaciones que se señalan a continuación.

La primera es que, si bien Alkire y Foster (2011) usan como unidad de análisis el hogar, en el modelo aquí desarrollado se considera que las experiencias individuales determinan dentro de los hogares trayectorias diferentes de bienestar (Franco-Correa, 2016). Por tal razón, para el cálculo de la pobreza multidimensional energética, en el modelo se emplea como unidad de análisis al individuo, al considerar que variables como los medios de comunicación son de uso personal: que un individuo no cuente con acceso a telefonía

para garantizar sus comunicaciones y que dependa de las demás personas en el hogar tiene implicaciones sobre su propio bienestar.

La segunda es que no se incluye la radio como medio de comunicación, pues la Encuesta Nacional de Calidad de Vida (2023) no cuenta con información sobre la propiedad de radio para comunicaciones por parte de las personas del hogar. Lo mismo ocurre con la variable de contaminación dentro del hogar, pues la pregunta relacionada se encuentra incluida en la dimensión de combustible para cocinar y, por tanto, se estaría dando un caso de correlación entre ambas variables que generaría duplicidad en el conteo.

En la Tabla 1, se comparan las condiciones originales y las decisiones acerca del segundo punto de corte del IPEM aquí propuesto.

**Tabla 1.** Decisiones normativas y fuente de los datos para el cálculo del IPEM

<i>Dimensión</i>	<i>Indicador</i>	<i>Peso original (Nussbaumer et al., 2012; Perez, 2019)</i>	<i>Variable</i>	<i>Primer punto de corte: un hogar es considerado privado en este indicador si ...</i>
Cocina	Combustible para cocinar moderno	0,2	¿Qué energía o combustible utilizan principalmente para cocinar?	Utiliza cualquier combustible diferente de electricidad, gas natural conectado a red pública, petróleo, gasolina, kerosene o alcohol, gas propano o GLP.
	Contaminación al interior del hogar	0,2	No se identificó en la base de datos	NA
Electricidad	Acceso a electricidad	0,2	¿Pagan en este hogar la electricidad que consumen?	No tiene el servicio
Servicios provistos por intermedio de electrodomésticos	Electrodomésticos disponibles en el hogar	0,13	¿Cuáles de los siguientes bienes posee el hogar?	No tiene nevera
Entretenimiento/Educación	Electrodomésticos para el entretenimiento y la educación disponibles en el hogar	0,13	¿Cuáles de los siguientes bienes posee el hogar? (TV a color convencional, TV LCD, plasma o LED)	No tiene (Se excluye la variable radio por no estar disponible en la ENCV)
Comunicación	Medios de comunicación	0,13	¿Tiene teléfono celular? ¿Tiene teléfono fijo?	No tiene teléfono

Fuente: Nussbaumer et al. (2012), Pérez (2019) y DANE (2024)

Finalmente, la tercera modificación corresponde a los pesos asignados a las variables, los cuales no se tomaron tal cual de Nussbaumer et al. (2012) y Pérez (2019), pues algunas de dichas variables no se encontraron en la base de datos que se usó y, además, por los

niveles de correlación de algunas de las variables incluidas en la medición. Por esa razón, en el modelo aquí desarrollado los pesos asignados a cada uno de los indicadores fueron distribuidos equitativamente (pesos iguales). Esta decisión normativa permitió que los resultados del modelo guardaran coherencia con las propiedades de los indicadores de conteo, de acuerdo con los postulados de Lasso de la Vega (2010) y Yalonetzky (2014).

### Variable proxy de violencia

El último indicador de este tablero de datos propuesto es el comportamiento de la tasa de homicidios por departamento para 2023, la cual se obtuvo de la Corporación Excelencia en la Justicia (2024), a partir de datos del Ministerio de Defensa Nacional.

## Resultados

### Acceso a la electricidad

En Colombia, según el Banco Mundial (2024b), el acceso a electricidad es del 100 %. Sin embargo, el dato es resultado de un cálculo estadístico que depende de las proyecciones demográficas. El último censo socioeconómico y demográfico (DANE, 2019) determinó que ninguno de los departamentos del país contaba con cobertura de 100% de la población, siendo particularmente evidente en departamentos como Caquetá, Putumayo, Amazonas, Chocó, Guaviare, Guainía, La Guajira, Vaupés y Vichada, donde, además, se concentra un alto porcentaje de población que habita en zona rural (Figura 1).

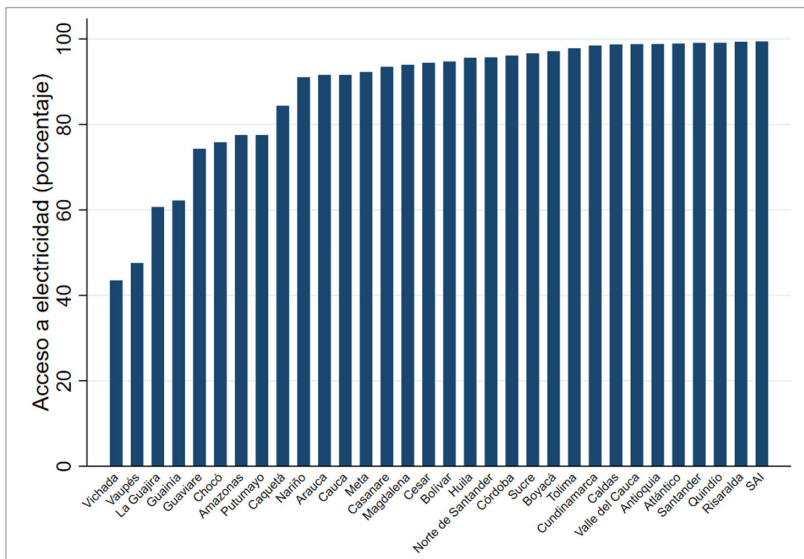


Figura 1. Acceso al servicio de electricidad en Colombia (2024).

Fuente: Terridata (2024)

Los anteriores datos contrastan con la ya mencionada ausencia de datos sobre disponibilidad de infraestructura y redes de conexión eléctrica. De ahí que haya sido necesario construir el IPEM.

## Índice de Pobreza Energética Multidimensional (IPEM)

Para determinar el nivel de incidencia de la pobreza energética en Colombia, se calcula el IPEM en Colombia, siguiendo a Nussbaumer et al. (2012) y a Reyes (2019). En primer lugar, se destaca el nivel de privación de elementos referidos a indicadores crudos, esto es, antes de su agregación en el índice compuesto. A nivel nacional, se encuentra que, en Colombia, el indicador con mayor número de privaciones es el correspondiente al acceso a electrodomésticos como televisión y medios para el entretenimiento o la educación (71,65%), seguido del teléfono (fijo o celular), como medio para garantizar la comunicación (20,92%) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Porcentaje de población privada de elementos referidos a indicadores crudos

Variable	Porcentaje de población privada en indicador crudo
Cocina moderna	9,54%
Electricidad	1,26%
Nevera	12,11%
Televisor	71,65%
Teléfono	20,92%

Fuente: Elaboración propia

Como medio de validación, se espera que, en la conversión de variables categóricas a variables *dummy*, donde 0 (no hay privación) y 1 (hay privación), estas se encuentren altamente correlacionadas entre sí, debido a que todas las variables que componen el índice dependen en cierta medida del acceso a electricidad.

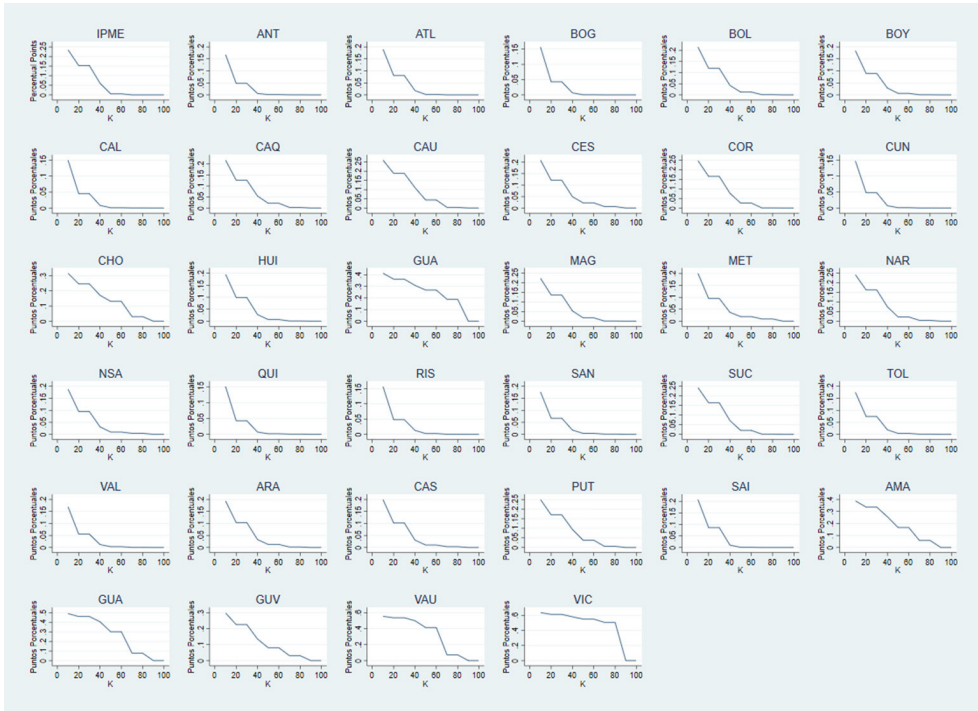
En la Tabla 3, se presenta un cálculo de las correlaciones tetracóricas identificadas en el procesamiento del IPEM.

**Tabla 3.** Correlaciones entre variables del IPEM

Variable	Cocina	Electricidad	Nevera	TV	Teléfono
Cocina	1				
Electricidad	0,7154	1			
Nevera	0,6899	0,8311	1		
Televisor	-0,0901	0,4642	0,0177	1	
Teléfono	0,4241	0,4994	0,4400	-0,0360	1

Fuente: Elaboración propia

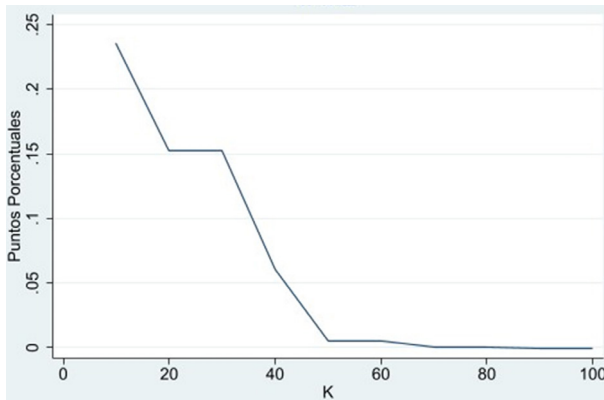
La Figura 2 presenta los resultados del IPEM estimado para cada uno de los departamentos, para toda la gama de posibilidades del segundo punto de corte, que corresponde al porcentaje de indicadores en los que se considera que una persona está en situación de pobreza energética multidimensional.



**Figura 2.** IPEM por departamento para todos los rangos del segundo punto de corte.

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del agregado nacional, se encuentra que, considerando los valores recomendados por Alkire y Foster (2011), es decir, el 30% de indicadores en los que un hogar es considerado como pobre de manera multidimensional, el IPEM muestra un valor cercano al 15% de pobreza energética multidimensional (Figura 3).

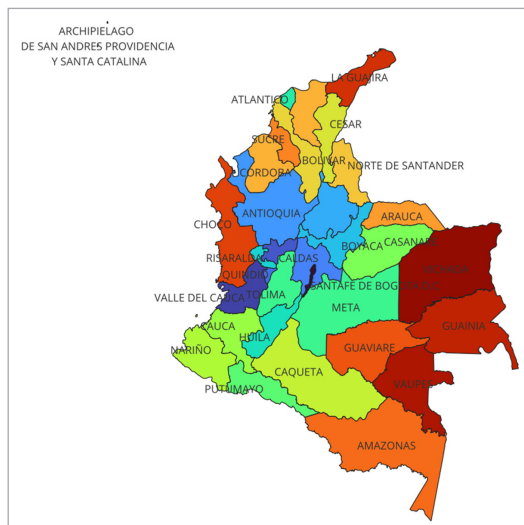


**Figura 3.** IPEM en Colombia, 2023.

Fuente: Elaboración propia

### Índice de Pobreza Multidimensional

En la Figura 4, se representan los valores de pobreza multidimensional reportados por el DANE para 2023, a partir de la información disponible en DANE (2024b). Los departamentos de la zona andina tienen los valores más bajos de pobreza multidimensional, con valores de entre 3,6 para Bogotá y 11,9 para Huila. En este rango está también San Andrés, Providencia y Santa Catalina, con 5,0. Entre los departamentos con mayor pobreza multidimensional se encuentran Vichada, con 65,4, y Amazonas, con 25,4.



**Figura 4.** Índice de Pobreza multidimensional en Colombia para 2023.

Nota. Los colores se relacionan con el valor del índice de pobreza multidimensional en orden creciente así: azules, amarillos, rojos. El valor mínimo, entonces, corresponde al azul oscuro de Bogotá, con 3,6; en el rango medio está Huila, con 11,9, y el rango más alto es Vichada, con 65,4 para Vichada.

Fuente: Elaboración propia, con datos del DANE (2024b)

## Modelo de la red eléctrica

La representación del modelo de la red eléctrica en el mapa de Colombia se muestra en la Figura 5. Los nodos se representan con círculos azules y los enlaces con líneas rojas. En este caso, no se ha representado la geometría real de los enlaces, sino que se muestran como líneas rectas entre los nodos. Dado que estos representan los extremos de las líneas de transmisión, su presencia en un departamento dado indica la actividad de dicho departamento en la red eléctrica. En la Tabla 4, se resume el número de nodos en cada departamento.

**Tabla 4.** Número de nodos en la red eléctrica por departamento

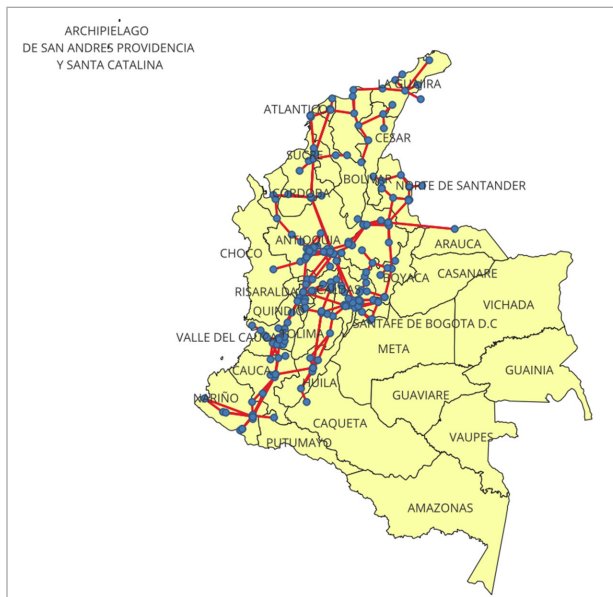
Entidad territorial (departamentos y Bogotá)	Número de nodos
Amazonas	0
Antioquia	48
Arauca	1
Atlántico	4
Bogotá D.C.	9
Bolívar	4
Boyacá	11
Caldas	13
Caquetá	1
Casanare	0
Cauca	11
Cesar	5
Chocó	1
Córdoba	14
Cundinamarca	25
Guainía	0
Guaviare	0
Huila	9
La Guajira	7
Magdalena	5
Meta	2
Nariño	12
Norte de Santander	9
Putumayo	1
Quindío	2
Risaralda	5
San Andrés y Providencia	0
Santander	23
Sucre	2
Tolima	11
Valle del Cauca	22
Vaupés	0
Vichada	0

Fuente: Elaboración propia con base en datos de ESRI (2010) y MinMinas (2009)

Según el número de nodos de la red, se identifican cuatro grupos:

- A) No aparecen representados en la red: Amazonas, Casanare, Guainía, Guaviare, San Andrés y Providencia, Vaupés y Vichada.
- B) Entre 1 y 10 nodos: Arauca, Atlántico, Bogotá D.C., Bolívar, Caquetá, Cesar, Chocó, Huila, La Guajira, Magdalena, Meta, Norte de Santander, Putumayo, Quindío, Risaralda y Sucre.
- C) Entre 11 y 25 nodos: Boyacá, Caldas, Cauca, Cundinamarca, Córdoba, Nariño, Santander, Tolima y Valle del Cauca.
- D) Más de 25 nodos: Antioquia.

Los departamentos que se encuentran en la categoría A no tienen una participación en la red eléctrica. Dado el bajo número de nodos en las categorías B y C, no es posible comparar los resultados del modelo de robustez de Schneider et al. (2011). Sin embargo, es claro que la cobertura del servicio para aquellos en el grupo B es sumamente frágil. El caso especial corresponde a Antioquia, que con 48 nodos está en una posición privilegiada con respecto a los demás departamentos de Colombia.

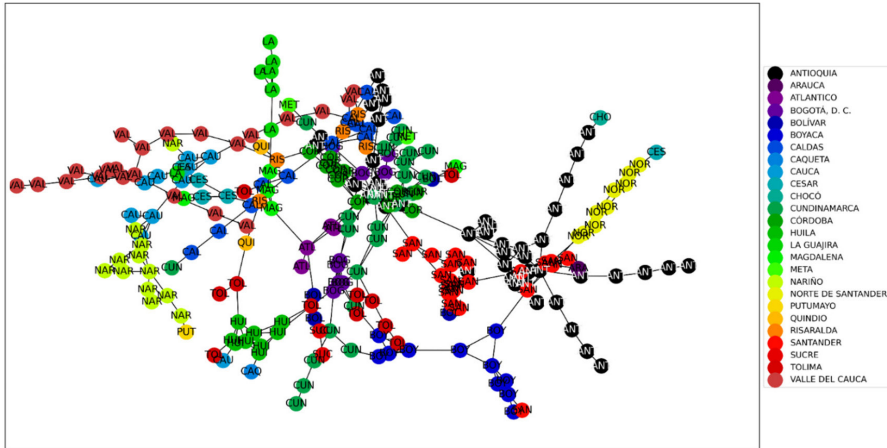


**Figura 5.** Modelo de la red eléctrica colombiana (representación geográfica).

Fuente: Elaboración propia con base en datos de ESRI (2010) y Ministerio de Minas y Energía (2009)

Una segunda forma de representar la red consiste en usar el algoritmo de Fruchterman y Reingold (1991). Este permite una mejor visualización mediante un método de cálculo de las posiciones de los nodos de equilibrio que usa una pseudosimulación de movimiento de los nodos (Sayama, 2015). La Figura 6 muestra la red así representada. Se puede ver que hay dos secciones de la red que se encuentran conectadas mediante un solo nodo con el resto

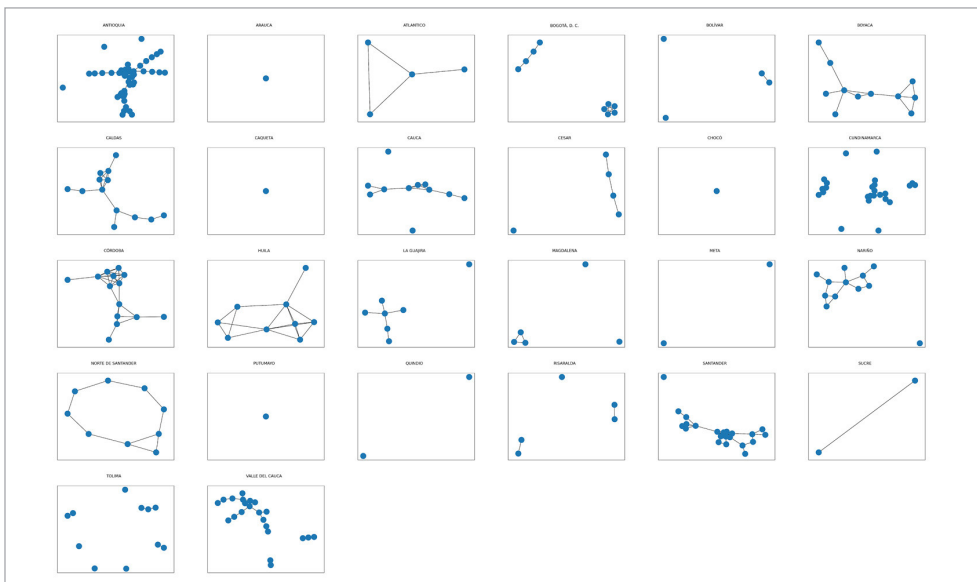
de la red. Se trata de los departamentos del suroccidente (los departamentos de Nariño y Putumayo) y el departamento del Magdalena. Por su parte, Antioquia, además de tener un gran número de nodos, se encuentra interconectado con diferentes subregiones de la red.



**Figura 6.** Modelo de la red eléctrica colombiana (representación de Fruchterman y Reingold, 1991).

Nota. Los colores representan diferentes regiones geográficas de los nodos (departamentos y Bogotá).

Fuente: Elaboración propia con base en datos de ESRI (2010) y Ministerio de Minas y Energía (2009)



**Figura 7.** Representación de las redes eléctricas de los diferentes departamentos, organizadas alfabéticamente.

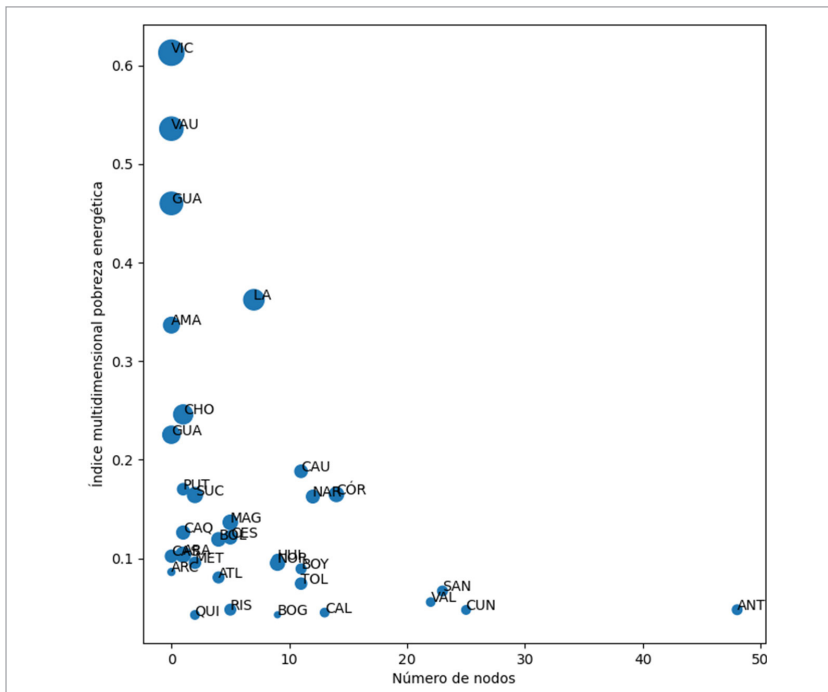
Fuente: Elaboración propia con base en datos de ESRI (2010) y Ministerio de Minas y Energía (2009)

Una vez se ha construido la red eléctrica, se puede hacer uso del algoritmo de Schneider et al. (2013) para medir la robustez de la red eléctrica ante ataques (Ecuación 1). El procedimiento consiste en simular una serie de ataques sucesivos a la red y medir la robustez después de cada uno de estos ataques. La robustez se define, entonces, como...

$$R = \frac{1}{N} \sum_{Q=1}^N S\left(\frac{Q}{N}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $N$  es el número de nodos,  $Q$  es el número de nodos removidos de la red,  $q = Q/N$  es la fracción de nodos que se han removido,  $S(a)$  es la fracción de nodos en la componente conectada más grande después de que se ha removido una fracción  $q$  de nodos. Utilizando esta definición, se estimó la robustez de la red eléctrica colombiana. El valor obtenido es de 0,0816, para la red colombiana, y de 0,1202, para la subred de Antioquia.

La Figura 8 muestra los resultados, donde se representa el valor del IPEM como función del número de nodos, mientras que el tamaño del punto representa el valor del Índice de Pobreza Multidimensional. Como puede observarse, departamentos como Vichada, Guainía y Vaupés tienen los peores valores en los tres indicadores, mientras que Antioquia se destaca en los tres valores. El comportamiento del departamento de Antioquia es claramente atípico.



**Figura 8.** IPEM como función del número de nodos de la red.

Nota. El tamaño de los puntos es proporcional al valor del Índice de Pobreza Multidimensional del DANE.

Fuente: Elaboración propia

Otra coincidencia que vale la pena señalar es que aquellos departamentos con mayor proporción de población étnica se encuentran concentrados en la parte superior izquierda de la gráfica, donde confluyen nodos eléctricos inexistentes o muy bajos, alta pobreza energética multidimensional y mayor pobreza multidimensional.

Al estimar la correlación en desempeño de los indicadores que dan cuenta de la pobreza en sus diversas formas (IPM e IPEM) y la tasa de homicidios, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Tabla de correlación entre tasa de homicidios, IPM e IPEM

Departamento	Tasa de homicidios	IPM	IPEM	Nodos
Amazonas	25	25,4	33,7	0
Antioquia	24	9,5	4,8	48
Arauca	49	22,8	10,4	1
Archipiélago de San Andrés	62	5	8,6	0
Atlántico	25	12	8,1	4
Bogotá	13	3,6	4,3	9
Bolívar	30	18,4	11,9	4
Boyacá	7	9,9	8,9	11
Caldas	12	7,4	4,5	13
Caquetá	33	17,2	12,6	1
Casanare	14	15	10,2	0
Cauca	54	15,8	18,8	11
Cesar	27	17,7	12,1	5
Chocó	36	37,4	24,6	1
Córdoba	16	21,4	16,5	14
Cundinamarca	12	7,6	4,8	25
Guainía	0	52,1	46,0	0
Guaviare	50	30,6	22,5	0
Huila	31	11,9	9,9	9
La Guajira	16	42,6	36,2	7
Magdalena	34	21,4	13,7	5
Meta	24	12,9	9,6	2
Nariño	27	16,6	16,3	12
Norte de Santander	31	20,5	9,5	9
Putumayo	62	13,2	17,0	1
Quindío	30	7,5	4,3	2
Risaralda	25	11,8	4,8	5
Santander	17	5	6,7	23
Sucre	34	9,8	16,4	2
Tolima	27	12,9	7,5	11
Valle del Cauca	49	7,2	5,6	22
Vaupés	2	55,7	53,6	0
Vichada	12	65,4	61,3	0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Corporación Excelencia en la Justicia (2024) y el DANE (2024a; 2024b)

La correlación entre las tres medidas indica que, a mayor tasa de homicidios, menor pobreza multidimensional y menor pobreza energética. Esto se puede deber a que, en las ciudades, que cuentan con mayor acceso a electricidad, se concentra mayor riqueza y mayor lógica criminal. En este sentido, la tasa de homicidios no es una buena variable *proxy* para la seguridad o la sensación de seguridad de la población mediada por la falta de acceso a infraestructura eléctrica pública.

Lo que sí se confirma, a partir de los datos de 2023, es la alta correlación (0,94) entre las medidas de pobreza multidimensional y pobreza energética multidimensional en Colombia. Primero, porque ambas provienen del mismo conjunto de datos y, segundo, porque, si bien el IPM de Colombia contiene algunas de las variables del IPEM, muestra la estrecha relación que existe entre pobreza y pobreza energética.

Además, a mayor número de nodos, que es el estadístico de infraestructura eléctrica más sencillo que se presenta en este artículo, se encuentra menos pobreza y menos pobreza energética, pero, sobre todo, menor tasa de homicidios. Y esto significa que su relación con este último indicador *proxy* de seguridad sí es relevante.

## Discusión y conclusiones

En este trabajo se examinó la distribución de los nodos y los enlaces de un modelo de la red eléctrica colombiana existente para el año 2010. Se encontró que existe un grupo de departamentos que no están representados en esta red, es decir, que no se encontraban interconectados a la red eléctrica, a saber: Amazonas, Casanare, Guainía, Guaviare, San Andrés y Providencia, Vaupés y Vichada. Asimismo, se identificó un segundo grupo, integrado por los departamentos de Arauca, Atlántico, Bogotá D.C., Bolívar, Caquetá, Cesar, Chocó, Huila, La Guajira, Magdalena, Meta, Norte de Santander, Putumayo, Quindío, Risaralda y Sucre, en los que la red presenta una alta fragilidad, dado que tienen menos de diez nodos.

De los restantes departamentos, solo se puede comparar la robustez de la subred de Antioquia, para la cual se obtuvo un valor de 0,1202, y de la red colombiana como tal, para la cual se obtuvo un valor de 0,0816. Según Schneider et al. (2011), el máximo valor de la robustez es de 0,5 y el mínimo es de  $1/N$ , donde  $N$  es el número de nodos; valor que para el caso colombiano sería de 0,0038. Según Louzada et al. (2015), el valor típico de robustez de una red no optimizada es cercano a  $0,1837 \pm 0,0053$ , y el de una red optimizada es cercano a  $0,2266 \pm 0,0055$ . Por lo tanto, puede concluirse que tanto la red colombiana como la red de Antioquia presentan un grado bajo de robustez.

Además de estos cálculos, la estructura geométrica de la red permite determinar que la subred del departamento de Antioquia está altamente interconectada con el resto de la red nacional. En cambio, tanto los departamentos del suroccidente como los departamentos de Magdalena y La Guajira están conectados únicamente por un nodo al resto de la red, lo que también evidencia su fragilidad.

Esta fragilidad se hace evidente también en el tablero de indicadores en el que se comparan el comportamiento del IPM, del IPEM a nivel departamental y de la tasa de homicidios. Si bien la tasa de homicidios se encuentra inversamente relacionada con las medidas de pobreza, incluida la de pobreza energética, la relación entre el número de nodos de la red y la variable *proxy* de seguridad empleada es inversa, es decir, que, a mayor disponibilidad y complejidad de la red eléctrica, se pueden esperar menores niveles de tasa de homicidios.

El IPEM es un indicador altamente correlacionado con el IPM. Sin embargo, cada uno mide dos conceptos y aproximaciones diferentes. Se puede concluir entonces que, si bien son cercanos, pues el acceso a bienes y servicios se encuentra mediado por el acceso a fuentes de electricidad (y, por tanto, la pobreza energética es una variable *proxy* de pobreza multidimensional), es necesario distinguir variables y dimensiones que se aproximen a una medición de la pobreza energética.

Los resultados de las combinaciones de métodos, indicadores y conceptos aquí usados justifican la necesidad de continuar ahondando en el problema de la pobreza energética y la resiliencia de la red eléctrica colombiana. La disminución profunda de los ataques contra la infraestructura eléctrica como resultado del Acuerdo de Paz es una ventana de oportunidad para cerrar las brechas territoriales en términos de acceso a la electricidad, que se constituyen en un medio para el logro del bienestar de la población. Así, futuros ejercicios pueden ahondar en las variables *proxies* relacionadas con la seguridad ciudadana (mediada por diferentes aproximaciones al crimen), la pobreza y el bienestar de la población.

La aproximación presentada en este artículo es innovadora, por ser la primera vez, hasta donde ha sido posible determinar, que se combinan la modelación de estructura de redes eléctricas y las medidas de bienestar y otras aproximaciones sociales, con un enfoque en la reducción de la pobreza. Esta aproximación es una propuesta que puede ser usada de manera más amplia en términos de política pública referida a la inversión en el fortalecimiento del acceso a la red eléctrica por parte de los hogares y los entornos en los que transcurre la vida.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Escuela Superior de Administración Pública por su apoyo en la realización de este artículo.

## Declaración de divulgación

Los autores declaran que no existe ningún potencial conflicto de interés relacionado con el artículo. No se emplearon herramientas de generación de contenido por inteligencia artificial para su elaboración.

## Financiamiento

Los autores no declaran fuente de financiamiento para la realización de este artículo.

## Sobre los autores

**Andrea Franco Correa** es Ph.D. en políticas públicas, Universidad de Maastricht, Países Bajos; magíster en economía y economista, Universidad Nacional de Colombia. Tiene una amplia experiencia en diseño, implementación, monitoreo y evaluación de políticas públicas, programas y proyectos, principalmente sociales. También se ha desempeñado como docente y catedrática.

<https://orcid.org/0000-0003-4421-7132> - Contacto: [afrancocorrea@cris.unu.edu](mailto:afrancocorrea@cris.unu.edu)

**Gabriel Villalobos Camargo** es Ph.D. en física, Universidad Nacional de Colombia; magíster en física, Georgia Institute of Technology, Estados Unidos, y físico, Universidad Nacional de Colombia. Tiene una amplia experiencia como docente e investigador en física computacional, modelado y simulación, ciencia de datos, estadística y dinámica no lineal. Actualmente se desempeña como profesor de tiempo completo en la ESAP.

<https://orcid.org/0000-0003-4582-265X> - Contacto: [gabriel.villalobos@esap.edu.co](mailto:gabriel.villalobos@esap.edu.co)

## Referencias

- Ackerman, G., Abhayaratne, P., Bale, J., Bhattacharjee, A., Blair, C., Hansell, L., Jayne, A., Kosal, M., Lucas, S., Moran, K., Seroki, L., & Vadlamudi, S. (2007). *Assessing terrorist motivations for attacking critical infrastructure* (Technical Report UCRL-TR-227068). Lawrence Livermore National Laboratory.
- Amin, M. (2008). Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: toward smart self-healing electric power grid. *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596791>
- Alkire, S., & Foster, J. (2011). Counting and multidimensional poverty measurement. *Journal of Public Economics*, *95*, 476-487. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2010.11.006>
- Arvate, P., Ortiz, F., Garcia, F., & Portela, A. (2017). Lightning and homicides: evaluating the effect of an electrification policy in rural Brazil on non-violent crime reduction. *Journal of Quantitative Criminology*, *34*, 1047-1078. <https://doi.org/10.1007/s10940-017-9365-6>
- Banco Mundial. (2024a, junio). *Global Economic Prospects, June 2024*. <https://hdl.handle.net/10986/41536>
- Banco Mundial. (2024b). *World Development Indicators* [con corte a 28 de junio de 2024]. <https://tinyurl.com/yxm6tybw>
- Barabási, A. L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, *286*, 509-512.
- Bartiaux, F., Van der Linde, M., Debast, N., & Baudaux, A. (2015). La pauvreté énergétique. En I. Pannecoucke, W. Lahaye, J. Vranken, & R. Van Rosse (Eds.), *Pauvreté en Belgique – Annuaire 2015* (pp. 153-172). POS; CeRIS; Gent; Mons.
- Becker, G. (1968). Crime and punishment: An economic approach. *Journal of Political Economy*, *76*, 169-217. <https://www.jstor.org/stable/1830482>
- Campbell, R. (1993). Fuel poverty and government response. *Social Policy and Administration*, *27*, 58-70. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9515.1993.tb00391.x>
- Centro Nacional de Memoria Histórica. (2024). *Bases de datos ¡Basta Ya!* <https://tinyurl.com/2d4pgc4a>
- Chester, L., & Morris, A. (2016). A new form of energy poverty is the hallmark of liberalised electricity sectors. *Australian Journal of Social Issues*, *46*, 435-459. <https://doi.org/10.1002/j.1839-4655.2011.tb00228.x>
- Clancy, J., Ummer, F., Shakya, I., & Kelkar, G. (2007). Appropriate gender-analysis tools for unpacking the gender-energy-poverty nexus. *Gender & Development*, *15*, 241-257. <https://doi.org/10.1080/13552070701391102>
- Corporación Excelencia en la Justicia. (2024). *Homicidios en Colombia por 100.000 habitantes*. <https://tinyurl.com/27ns3r5n>

- Culver, L. (2017). *Energy poverty: What you measure matters*. (pre-symposium white paper for: Reducing Energy Poverty with Natural Gas: Changing Political, Business, and Technology Paradigms). Stanford University. <https://tinyurl.com/4c38vd9x>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2014). *Metodología Índice de Pobreza Multidimensional IPM*. <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PM/met-IPM.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. <https://tinyurl.com/wratcsc>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2024a). *Encuesta Nacional de Calidad de Vida. Microdatos*. <https://tinyurl.com/26x69yq4>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2024b). *Incidencia de la Pobreza Multidimensional Departamentos 2018-2023*. <https://tinyurl.com/e5jw4kpf>
- ESRI. (2010). *Centrales generadoras y líneas de transmisión eléctrica* [mapa interactivo]. <https://tinyurl.com/2btvxudvw>
- Franco-Correa, A. (2016). *On the measurement of multidimensional poverty as a policy tool. Empirical applications to Chile, Colombia, Ecuador and Peru* [tesis doctoral, Maastricht University, Países Bajos]. Datawyse. <https://tinyurl.com/2b8lvjga>
- Fruchterman, T. M., & Reingold, E. M. (1991). Graph drawing by force-directed placement. *Software: Practice and Experience*, 21, 1129-1164.
- Giroux, J., Burgherr, P., & Melkunaite, L. (2013). Research note on the energy infrastructure attack database (EIAD). *Perspectives on Terrorism*, 7, 113-125. <https://www.jstor.org/stable/26297069>
- Guzowski, C., Ibañez-Martin, M. M., & Zabaloy, M. (2021). Pobreza energética: Conceptualización y su vínculo con la exclusión. Breve revisión para América Latina. *Revista Ambiente y Sociedad*, 24. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200027r2vu2021L2DE>
- Hagberg, A., & Conway, D. (2020). *Networkx: Network analysis with python*. <https://networkx.github.io>
- Harrison, C., & Popke, J. (2011). Because you got to have heat: the networked assemblage of energy poverty in Eastern North Carolina. En *The new geographies of energy*. Routledge.
- Healy, J., & Clinch, J. (2004). Quantifying the severity of fuel poverty, its relationship with poor housing and reasons for non-investment in energy-saving measures in Ireland. *Energy Policy*, 32, 207-220. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00265-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00265-3)
- Inskip, N., & Goff, C. (1974). *A preliminary evaluation of the Portland lightning project*. Oregon Law Enforcement Council. <https://tinyurl.com/28w8bqcj>
- Katsoulakos, N. (2011). Combating energy poverty in mountainous areas through energy-saving interventions. *Mountain Research and Development*, 31, 284-292. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00049.1>
- Kitchen, T., & O'Reilly, P. (2016). Energy poverty amidst abundance in Malaysia: placing energy in multidimensional poverty. *Development in Practice*, 26, 202-213. <https://doi.org/10.1080/09614524.2016.1133562>
- Lasso de la Vega, M. (2010). Counting poverty orderings deprivation curves. En J. Bishop (Ed.), *Research on Economic Inequality* (pp. 153-172). Emerald Group Publishing.
- Lawlor, D. (2001). The health consequences of fuel poverty: what should the role of primary care be? *British Journal of General Practice*, 435-436. <https://tinyurl.com/y3w3n5yx>
- Liddell, C. (2009). *The health impacts of fuel poverty on children*. Ulster University. <https://tinyurl.com/268c4amm>
- Lordan-Perret, R., Wright, A., Burgherr, P., Spada, M., & Rosner, R. (2019). Attacks on energy infrastructure targeting democratic institutions. *Energy Policy*, 132, 915-927. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.025>
- Louzada, V. H. P., Daolio, F., Herrmann, H. J., & Tomassini, M. (2015). Generating robust and efficient networks under targeted attacks. En D. Król, D. Fay, & B. Gabryś (Eds.), *Propagation phenomena in real world networks. Intelligent systems reference library* (vol. 85, pp. 153-172). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-15916-4\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15916-4_9)
- Ministerio de Defensa Nacional (MinDefensa). (2024). *Seguimiento a indicadores de seguridad y resultados operacionales. Mayo 2024*.

- Ministerio de Minas y Energía (MinMinas). (2009). *Plan de expansión de referencia: generación-transmisión, 2009-2023*. Subdirección de Planeación Energética. <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/1851>
- Mirza, B., & Szirmai, A. (2010). *Towards a new measurement of energy poverty: A cross-community analysis of rural Pakistán* (Working Paper Series, 24). United Nations University; Maastricht Economic and Social Research and Training Centre on Innovation and Technology. <https://tinyurl.com/4zfc39vf>
- Nussbaumer, P., Bazilian, M., & Modi, V. (2012). Measuring energy poverty: focusing on what matters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.150>
- Pachauri, S., & Spreng, D. (2004). Energy use and energy access in relation to poverty. *Economic and Political Weekly*, 39, 271-278. <https://www.jstor.org/stable/4414526>
- Pérez, J. (2019). *Pobreza energética en Colombia: evidencia empírica de 2011 a 2016* [tesis de maestría, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá]. <https://tinyurl.com/25w4wcbk>
- Petrova, S., Gentile, M., Mäniken, I. H., & Bouzarovski, S. (2013). Perceptions of thermal comfort and housing quality: exploring the microgeographies of energy poverty in Stakhanov, Ukraine. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 45, 1240-1257. <https://doi.org/10.1068/a45132>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD]. (2015). *Objetivo 7. Energía asequible y no contaminante*. <https://tinyurl.com/282yk7b3>
- Ravallion, M. (2010). *Mashup indices of development* (Policy Research Working Paper, 5432). Banco Mundial. <https://tinyurl.com/bdbjrs7x>
- Ravallion, M. (2011). On multidimensional indices of poverty. *Journal of Economic Inequality*, 9, 235-248. <https://doi.org/10.1007/s10888-011-9173-4>
- Romanello, M., McGushin, A., Di Napoli, C., Drummond, P., Hughes, N., Jamart, L., Kennard, H., Lampard, P., Solano Rodríguez, B., Arnell, N., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Cai, W., Campbell-Lendrum, D., Capstick, S., Chambers, J., Chu, L., Ciampi, L., Dalin, C., ... Hamilton, I. (2021). The 2021 report of the Lancet count-down on health and climate change: code red for a healthy future. *The Lancet*, 398, 1619-1662. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01787-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01787-6)
- Sagar, A. (2005). Alleviating energy poverty for the world's poor. *Energy Policy*, 33, 1367-1372. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.01.001>
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*. Open SUNY Textbooks.
- Schneider, C. M., Moreira, A. A., Andrade, J. S., Havlin, S., & Herrmann, H. J. (2011). Mitigation of malicious attacks on networks. *PNAS*, 108, 3838-3842. <https://doi.org/10.1073/pnas.1009440108>
- Schneider, C. M., Araújo, N. A. M., & Herrmann, H. J. (2013). Algorithm to determine the percolation largest component in interconnected networks. *Physical Review E*, 87, 043302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.87.043302>
- Sen, A. (1988). The concept of development. En H. Chenery, & T. Srinivasan (Eds.), *Handbook of Development Economics* (vol. I, pp. 9-26). Elsevier Science Publishing Company. [https://doi.org/10.1016/S1573-4471\(88\)01004-6](https://doi.org/10.1016/S1573-4471(88)01004-6)
- Sen, A. (1999). *Development as freedom*. Oxford University Press.
- Tealde, E. (2022). The unequal impact of natural light on crime. *Journal of Population Economics*, 35, 893-934. <https://doi.org/10.1007/s00148-021-00831-8>
- Walker, G. (2008). Decentralised systems and fuel poverty: are there any links or risks? *Energy Policy*, 36, 4514-4517. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.020>
- Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393, 440-442.
- Yalonzky, G. (2014). Conditions for the most robust multidimensional poverty comparisons using counting measures and ordinal variables. *Social Choice Welfare*, 43, 773-807. <https://doi.org/10.1007/s00355-014-0810-2>