

Modelo de clustering y teoría de juegos para priorizar intervenciones en pobreza
multidimensional

Carlos Alberto Peña Castiblanco

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Especialización en Machine Learning

6 de septiembre de 2025
Bogotá D.C

Contenido

Planteamiento del Problema	5
Antecedentes del problema.....	5
Descripción del problema.....	6
Pregunta de investigación.....	7
Objetivos.....	7
Objetivo general.....	7
Justificación	8
Marco Teórico	9
Fundamentos de la pobreza multidimensional en Colombia y América Latina.....	9
<i>La metodología Alkire-Foster como base del enfoque multidimensional</i>	9
<i>La adopción del IPM en Colombia y su proyección regional</i>	10
Aplicaciones del clustering en estudios territoriales y socioeconómicos.....	12
<i>Aprendizaje no supervisado y el potencial del clustering</i>	12
<i>Clustering aplicado a territorios y pobreza regional</i>	13
Teoría de juegos y equilibrio de Nash en la asignación de recursos.....	14
<i>Fundamentos del equilibrio de Nash</i>	14
<i>Aplicaciones en políticas públicas y restricciones presupuestarias</i>	14
<i>Integración con análisis territorial y focalización de recursos</i>	15
Metodología	17
Primer nivel.....	17
<i>Enfoque, alcance y diseño de la investigación Enfoque de la investigación</i>	17
Definición de variables	19
Población y muestra.....	20
Población	20
Muestra.....	20
Nivel de análisis y agregación.....	21
Fuentes de información.....	21
Segundo nivel.....	22
Conceptualización del uso de modelos, referentes y técnicas particulares.....	22
Componentes funcionales del modelo aplicado	22
Instrumentos de recolección de información	23

Técnicas de análisis de datos	24
Análisis y discusión de resultado	25
Análisis de la pobreza multidimensional en los municipios colombianos	25
Resultados del modelo de clustering.....	27
<i>Segmentación general de municipios</i>	27
<i>Subclustering dentro del grupo vulnerable</i>	28
Promedios de las variables por subcluster	30
<i>Discusión e interpretación de los resultados</i>	31
Análisis estratégico basado en teoría de juegos para la focalización de recursos	32
<i>Planteamiento del escenario estratégico</i>	32
<i>Modelo de decisión tipo equilibrio de Nash</i>	33
<i>Ejemplo aplicado: 20 municipios de Antioquia pertenecientes al Cluster 2 (vulnerabilidad moderada)</i>	34
Implicaciones para el modelo propuesto	36
<i>Discusión general e integración de resultados</i>	36
Conclusiones	37
Referencias.....	39

Resumen

La pobreza multidimensional en Colombia afecta especialmente a municipios rurales y apartados, donde persisten privaciones en educación, salud, vivienda y acceso a servicios básicos. Este proyecto propone clasificar municipios mediante técnicas de clustering, integrando principios de teoría de juegos como aporte diferenciador para orientar decisiones de asignación de recursos. Al combinar segmentación territorial con el equilibrio de Nash, se plantea un marco innovador que busca optimizar la focalización de intervenciones públicas y privadas en escenarios de recursos limitados.

Palabras clave: Pobreza multidimensional, clustering, teoría de juegos, equilibrio de Nash, equidad territorial, política pública.

Planteamiento del Problema

Antecedentes del problema.

La pobreza en Colombia ha dejado de ser entendida exclusivamente como una carencia de ingresos para convertirse en un fenómeno complejo y multidimensional. La adopción del Índice de Pobreza Multidimensional (IPM), desarrollado bajo la metodología Alkire-Foster, ha permitido identificar privaciones en aspectos como educación, salud, vivienda, trabajo y servicios públicos, brindando un panorama más completo sobre las condiciones de vida de los colombianos (Alkire & Foster, 2011). Actualmente, más del 11% de la población colombiana se encuentra en situación de pobreza multidimensional, con una concentración alarmante en zonas rurales (DANE, 2024), lo que evidencia fuertes desigualdades territoriales que requieren intervenciones focalizadas.

Estudios recientes han mostrado que la pobreza en Colombia presenta patrones espaciales y de concentración territorial, donde municipios con características geográficas, económicas y sociales similares tienden a compartir niveles comparables de privación (Gutiérrez, Cortés, & Montaña, 2020) plantea un reto en la formulación de políticas públicas, pues la diversidad de necesidades implica que las intervenciones deben adaptarse a contextos específicos para ser efectivas.

En este sentido, las técnicas de aprendizaje automático no supervisado, como el *clustering*, han demostrado ser útiles para clasificar territorios según patrones de datos y facilitar la segmentación de políticas (Wang & Biljecki, 2022). En el contexto colombiano, trabajos como el de Método clúster para clasificar y pronosticar perfiles de pobreza multidimensional en las cabeceras municipales de Colombia (Grisales Aguirre, 2020), ha aplicado estas metodologías para agrupar municipios en función de indicadores socioeconómicos, generando insumos valiosos para la planificación territorial.

No obstante, la asignación de recursos entre territorios no solo depende de la identificación de grupos vulnerables, sino también de la interacción estratégica entre los actores involucrados — gobierno, sector privado y organizaciones sociales—, quienes pueden tener intereses y limitaciones distintas. Aquí, la teoría de juegos y, en particular, el concepto de equilibrio de Nash, ofrece un marco analítico para entender cómo las decisiones de cada actor afectan las de los demás, y cómo alcanzar estados estables y eficientes de asignación (Guerrero Salas, Mayorga Morato, & Suárez, 2024).

La integración de un modelo de *clustering* con principios de teoría de juegos permite no solo identificar los municipios más vulnerables según su perfil de privaciones, sino también proponer estrategias de focalización que reconozcan la escasez de recursos y las interdependencias estratégicas entre actores. De esta manera, se busca optimizar el impacto de las intervenciones públicas y privadas, maximizando el beneficio social en escenarios de recursos limitados y necesidades heterogéneas

Descripción del problema.

En Colombia, la pobreza multidimensional continúa afectando de manera significativa a amplios sectores de la población, especialmente en zonas rurales y municipios apartados, donde las privaciones en educación, salud, vivienda y acceso a servicios básicos limitan el desarrollo humano. Aunque el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) permite medir y comparar estas condiciones a nivel municipal, las políticas de intervención suelen aplicar criterios generales que no capturan la diversidad de contextos y necesidades locales (DANE, 2024).

La falta de herramientas analíticas para segmentar municipios según patrones de privación dificulta la priorización eficiente de recursos, un desafío crítico en escenarios de presupuesto

limitado. Esto se traduce en intervenciones menos efectivas y en una distribución desigual de ayudas, afectando la equidad territorial.

Este proyecto propone el uso de técnicas de *machine learning* no supervisado (clustering) para identificar grupos de municipios con carencias similares, y complementa este análisis con principios de teoría de juegos, a fin de orientar la asignación estratégica de recursos públicos y privados. La combinación de estas metodologías ofrece una oportunidad para optimizar el impacto social de las intervenciones, garantizando que se enfoquen en los territorios y necesidades más urgentes.

Pregunta de investigación.

¿Cómo identificar y clasificar municipios con pobreza multidimensional para optimizar la distribución de recursos limitados mediante *clustering* y principios de teoría de juegos?

Objetivos

Objetivo general

Clasificar municipios colombianos con pobreza multidimensional mediante técnicas de *clustering*, integrando principios de teoría de juegos para optimizar la distribución de recursos limitados y orientar la focalización estratégica de intervenciones públicas y privadas.

Objetivos específicos.

1. Analizar las condiciones de pobreza multidimensional en los municipios colombianos a partir de datos públicos oficiales, identificando las variables más críticas para la segmentación territorial.

2. Aplicar técnicas de *machine learning* no supervisado (*clustering*) para agrupar municipios con perfiles similares de carencias, facilitando su interpretación y visualización.
3. Proponer un marco de asignación estratégica de recursos basado en principios de teoría de juegos, orientado a optimizar la focalización de intervenciones en los grupos de municipios priorizados.

Justificación

El creciente volumen de información disponible y los avances en la analítica de datos ofrecen hoy una oportunidad sin precedentes para transformar la formulación de políticas públicas. Como señala el *Behavioural Insights Team*, la ciencia de datos permite mejorar la productividad y la eficacia de los servicios gubernamentales al identificar patrones, focalizar intervenciones y asistir en la toma de decisiones con base en evidencia (Sanders, Lawrence, Gibbons, & Calcraft, 2017). En un país como Colombia, caracterizado por fuertes desigualdades territoriales, aprovechar estas herramientas no solo es conveniente, sino necesario para orientar la acción pública hacia los territorios más vulnerables y optimizar el uso de recursos limitados.

En esa misma línea, los avances en inteligencia artificial (IA) representan una oportunidad y, al mismo tiempo, un desafío para la gestión pública en Colombia. Tal como señalan Jay, Padilla y Rodelo en el 2024, el Estado ha comenzado a formular marcos éticos y proyectos de ley orientados a regular la IA con el fin de garantizar su aplicación responsable, transparente y en beneficio de la sociedad (Jay Vanegas, Padilla Santamaria, & Rodelo Molina, 2024). Sin embargo, estos esfuerzos aún son incipientes y requieren de enfoques integrales que permitan traducir el potencial tecnológico en soluciones concretas frente a problemáticas sociales como la pobreza y la desigualdad. En este contexto, investigaciones que integren metodologías de *machine learning* con principios estratégicos de asignación de recursos se vuelven altamente

pertinentes, pues contribuyen a conectar el desarrollo tecnológico con la satisfacción de necesidades sociales críticas.

Finalmente, la incorporación de la teoría de juegos como complemento metodológico constituye un aporte teórico diferenciador de este proyecto. Desde el trabajo pionero de Nash (1950), el equilibrio en juegos no cooperativos se ha entendido como un punto en el que las decisiones de cada actor no pueden mejorar de manera unilateral sin afectar a los demás (Villegas, 2016). Trasladado al ámbito de las políticas públicas, este enfoque permite analizar cómo múltiples actores —Estado, sector privado y sociedad civil— interactúan estratégicamente cuando los recursos son limitados. Así, proponer un marco de asignación basado en teoría de juegos no solo fortalece la rigurosidad académica de la investigación, sino que ofrece un instrumento innovador para orientar decisiones colectivas en contextos de pobreza multidimensional. De este modo, el estudio conecta la analítica de datos con modelos estratégicos de decisión, aportando tanto a la práctica de las políticas públicas como al desarrollo del conocimiento interdisciplinar.

Marco Teórico

Fundamentos de la pobreza multidimensional en Colombia y América Latina

La metodología Alkire-Foster como base del enfoque multidimensional

El estudio de la pobreza ha evolucionado desde enfoques unidimensionales, centrados exclusivamente en el ingreso, hacia aproximaciones más integrales que capturan la complejidad de las privaciones humanas. La metodología Alkire-Foster (AF) se ha consolidado como un marco ampliamente aceptado para medir la pobreza multidimensional, pues combina la simplicidad del enfoque de conteo con la rigurosidad de los métodos axiomáticos. Su propuesta central, el Índice de Pobreza Multidimensional ajustado ($M0$), permite identificar no solo la

incidencia de la pobreza sino también su intensidad, reconociendo la distribución conjunta de las privaciones en salud, educación, vivienda y otros ámbitos. Esta flexibilidad metodológica ha convertido al enfoque AF en una herramienta de gran utilidad para orientar la formulación de políticas públicas y focalizar intervenciones sociales en contextos de desigualdad persistente (Alkire S. , y otros, 2015).

La adopción del IPM en Colombia y su proyección regional

En Colombia, la metodología Alkire-Foster fue adaptada oficialmente por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) para construir el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM-Colombia), vigente desde 2011. Este índice se estructura en cinco dimensiones críticas: condiciones educativas del hogar, condiciones de la niñez y juventud, trabajo, salud y acceso a servicios públicos domiciliarios y vivienda, que a su vez se desagregan en quince indicadores ponderados de manera equitativa (Angulo Salazar, Díaz Cuervo, & Pardo Pinzón, 2016). Cada dimensión refleja aspectos directamente vinculados con la política social, lo que convierte al IPM en una herramienta de seguimiento y diseño de programas públicos. La evidencia empírica muestra, por ejemplo, que las mayores privaciones se concentran en el empleo informal y el bajo logro educativo, mientras que indicadores como la afiliación en salud o la asistencia escolar han mejorado con el tiempo. Este diseño permite que el IPM no solo mida la incidencia de la pobreza, sino también su intensidad y severidad, ofreciendo un panorama integral de las carencias que enfrentan los hogares colombianos.

En este marco, la comprensión de la pobreza en Colombia no puede desligarse del contexto latinoamericano. La evidencia presentada por la FAO en su *Panorama de la pobreza rural en América Latina y el Caribe* (FAO, 2023) muestra que la pobreza en la región tiene un fuerte componente territorial, especialmente en zonas rurales, donde persisten rezagos estructurales que reproducen desigualdades históricas. Este enfoque complementa la aplicación del índice

multidimensional en Colombia, al demostrar que dimensiones como la educación, la salud, la vivienda y el empleo no solo son centrales a nivel nacional, sino que también reflejan patrones comunes en la región. Además, el informe documenta cómo estas carencias tienden a concentrarse espacialmente, conformando verdaderas “trampas territoriales” que limitan las oportunidades de desarrollo y demandan políticas focalizadas y sostenibles. Por tanto, la utilización de enfoques multidimensionales no es únicamente una decisión metodológica, sino una respuesta necesaria a la naturaleza compleja y desigual de la pobreza en el territorio, reforzando la pertinencia del análisis planteado para Colombia.

En síntesis, la adopción del enfoque multidimensional en Colombia y en América Latina evidencia la necesidad de superar las mediciones basadas únicamente en el ingreso y de reconocer la diversidad territorial de las carencias. Las dimensiones críticas del IPM no solo reflejan la complejidad de la pobreza, sino que también permiten establecer comparaciones regionales que resaltan la persistencia de desigualdades en educación, salud, vivienda y empleo. La siguiente tabla resume las principales dimensiones y su relevancia en el contexto colombiano y latinoamericano.

Tabla1: Dimensiones del IPM en Colombia y en América Latina

Dimensión	Colombia (IPM-DNP)	Contexto Latinoamericano (FAO, 2018)
Educación	Bajo logro educativo, analfabetismo, asistencia escolar	Brechas urbano-rurales, rezago en mujeres y jóvenes
Salud	Barreras de acceso, mortalidad infantil, afiliación	Cobertura desigual en zonas rurales y dispersas

Vivienda y servicios	Materiales inadecuados, hacinamiento, acceso a agua y saneamiento	Déficit de vivienda rural, servicios básicos precarios
Trabajo	Desempleo de larga duración, informalidad laboral	Altos niveles de informalidad y baja productividad
Niñez y juventud	Deserción escolar, trabajo infantil	Vulnerabilidad estructural de niños y adolescentes

Fuente: elaboración propia con base en (Angulo Salazar, Díaz Cuervo, & Pardo Pinzón, 2016) y (FAO, 2023).

Aplicaciones del clustering en estudios territoriales y socioeconómicos

Aprendizaje no supervisado y el potencial del clustering

El aprendizaje automático no supervisado se ha consolidado como una de las herramientas más útiles para analizar grandes volúmenes de datos sin necesidad de etiquetas previas. Su principal aporte radica en la capacidad de identificar patrones ocultos y generar agrupaciones de observaciones con características similares, reduciendo la intervención humana y los sesgos asociados al análisis convencional. Tal como destaca (Iwasawa, Ueno, Masui, & Tajima, 2022), los algoritmos de *clustering* como K-means y *fuzzy-c-means* permiten categorizar automáticamente conjuntos de datos complejos, facilitando su visualización e interpretación en distintos contextos científicos. Estas ventajas metodológicas resultan especialmente relevantes para estudios territoriales, donde los municipios presentan heterogeneidad en múltiples dimensiones sociales y económicas, y se requiere una aproximación objetiva que clasifique perfiles comparables de pobreza multidimensional.

Clustering aplicado a territorios y pobreza regional

La aplicación del *clustering* en estudios territoriales ha mostrado su efectividad para generar agrupaciones homogéneas que permiten una mejor toma de decisiones en ámbitos complejos. (Jennings, 2008), documenta cómo la metodología K-means fue utilizada para definir territorios geográficos en el sector asegurador de Estados Unidos, agrupando áreas con riesgos similares en términos de pérdidas esperadas. En este estudio, la homogeneidad de los territorios se midió a través de la reducción de la varianza intra-cluster, que pasó de 29,4% a 5,3%, evidenciando la capacidad del método para crear agrupaciones consistentes y útiles. Más allá del caso actuarial, este enfoque es extrapolable al análisis socioeconómico, donde las variables de educación, salud, vivienda y empleo pueden actuar como factores de segmentación que, al ser procesados mediante técnicas de *clustering*, permiten identificar territorios comparables con problemáticas comunes.

Una aplicación reciente y directamente comparable es el estudio de *Identifying Regional Patterns of Poverty in Indonesia: a Clustering Approach Using K-Means*, (Wahyuni, 2025), que empleó el algoritmo K-means para identificar patrones regionales de pobreza en 38 provincias de Indonesia a partir de datos socioeconómicos. El análisis permitió clasificar los territorios en tres grupos — bajo, medio y alto nivel de pobreza— y obtuvo un *silhouette score* de 0,613, indicador aceptable de calidad en la agrupación. Estos resultados muestran cómo el *clustering* puede ofrecer información cuantitativa útil para orientar políticas focalizadas y diferenciadas según las características territoriales. El valor de este enfoque radica en su capacidad para simplificar la heterogeneidad de datos complejos y convertirla en evidencia accionable.

Teoría de juegos y equilibrio de Nash en la asignación de recursos

Fundamentos del equilibrio de Nash

La teoría de juegos constituye una de las herramientas más influyentes para analizar situaciones donde múltiples actores toman decisiones interdependientes. Su aporte central es el concepto de **equilibrio de Nash**, formulado originalmente por John Nash (1950, 1951), quien demostró que en todo juego finito existe al menos un equilibrio en estrategias mixtas gracias al teorema del punto fijo de Brouwer. Dicho equilibrio se define como el conjunto de estrategias en el que ningún jugador puede mejorar su resultado desviándose de manera unilateral, lo que garantiza la estabilidad de las decisiones colectivas. Como explican (Ricart, 1988) y otros autores, este marco proporciona un fundamento riguroso para estudiar interacciones estratégicas en escenarios económicos, sociales y políticos. En el contexto de la asignación de recursos limitados, el equilibrio de Nash permite modelar cómo los diferentes actores —gobiernos, empresas o comunidades— ajustan sus decisiones hasta alcanzar resultados donde ninguno tiene incentivos para cambiar unilateralmente, ofreciendo un criterio robusto para orientar políticas públicas y acuerdos de cooperación.

Aplicaciones en políticas públicas y restricciones presupuestarias

El potencial del equilibrio de Nash para orientar la toma de decisiones en políticas públicas se ha demostrado en aplicaciones concretas. (Stawska, Malaczewski, & Szymańska, 2019) analizan cómo gobiernos y bancos centrales en países de la Unión Europea interactúan estratégicamente bajo restricciones presupuestarias, utilizando modelos de teoría de juegos para explicar la asignación de recursos y la coordinación de políticas económicas. Sus resultados muestran que, aun en contextos de tensiones entre objetivos de estabilidad fiscal y crecimiento económico, es posible identificar equilibrios estables en los que ninguna de las partes tiene incentivos para

desviarse unilateralmente. Este tipo de aplicaciones refuerza la pertinencia de emplear la teoría de juegos en el análisis de la focalización de recursos sociales en Colombia, donde distintos actores —Estado, sector privado y organizaciones sociales— enfrentan limitaciones presupuestarias y deben coordinar decisiones para maximizar el impacto de sus intervenciones.

Ahora bien, la discusión sobre la asignación de recursos en políticas públicas no puede limitarse únicamente al plano económico-estratégico. A las tensiones derivadas de la coordinación entre actores —como las analizadas mediante el equilibrio de Nash en la Unión Europea— se suma la necesidad de contar con marcos jurídicos que legitimen dichas decisiones bajo condiciones de restricción presupuestaria. En este sentido, (Corti, 2017) expone cómo los Estados frecuentemente alegan limitaciones financieras para justificar incumplimientos de derechos fundamentales, especialmente en contextos de crisis y austeridad. La jurisprudencia de la Corte Suprema argentina ha dado lugar a una clasificación de cuatro modelos de control judicial de dichas restricciones: fuerte, semifuerte, moderado y de autolimitación. Mientras que el primero afirma la primacía de los derechos aun frente a limitaciones financieras, los modelos intermedios reconocen la necesidad de ponderar recursos disponibles, siempre bajo el principio de razonabilidad y con la obligación estatal de demostrar que ha hecho el máximo esfuerzo posible. Este marco jurídico resulta esencial para legitimar propuestas de asignación estratégica de recursos, pues establece que las limitaciones financieras no pueden usarse como excusa automática, sino que deben ser evaluadas con base en criterios objetivos y bajo control judicial.

Integración con análisis territorial y focalización de recursos

La integración de la teoría de juegos con el análisis territorial ha demostrado ser una alternativa metodológica innovadora para la planificación espacial. (Maleki, Masoumi, Hakimpour, & Coello, 2020), desarrollaron un sistema de apoyo a la decisión para la planificación urbana que modela la competencia entre actores locales como un juego estratégico. En este enfoque, los propietarios

de terrenos se consideran jugadores que buscan maximizar la utilidad de sus decisiones de uso del suelo, mientras que los planificadores emplean el equilibrio de Nash como criterio para alcanzar distribuciones estables y óptimas. Los resultados muestran que esta combinación permite reducir significativamente la insatisfacción de los actores y mejorar la eficiencia de las asignaciones en comparación con algoritmos de optimización tradicionales. Estos hallazgos refuerzan la viabilidad práctica de articular el *clustering* territorial con marcos de decisión estratégica basados en teoría de juegos, aportando un modelo replicable para la focalización de recursos en contextos de pobreza multidimensional en Colombia.

Tabla 2: Integración de teoría de juegos y análisis territorial según Maleki

Aspecto	Descripción
Contexto de aplicación	Planificación urbana con competencia entre actores locales.
Enfoque metodológico	Modelado de decisiones estratégicas mediante teoría de juegos.
Criterio de estabilidad	Uso del equilibrio de Nash para alcanzar distribuciones óptimas.
Resultado principal	Reducción de la insatisfacción de actores y mayor eficiencia en asignaciones.
Relevancia para este proyecto	Demuestra la viabilidad de combinar <i>clustering</i> territorial con teoría de juegos para focalizar recursos.

Fuente: Elaboración propia con base en (Maleki, Masoumi, Hakimpour, & Coello, 2020)

Metodología

Primer nivel

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

Enfoque de la investigación

El presente estudio adopta un **enfoque cuantitativo**, dado que utiliza información estadística proveniente de fuentes secundarias oficiales para el análisis de patrones de pobreza multidimensional en los municipios de Colombia. (Ariza & Retajac, 2022) El enfoque cuantitativo permite medir y comparar objetivamente las condiciones de vida de los hogares mediante indicadores socioeconómicos expresados en variables numéricas, lo que posibilita aplicar técnicas de análisis estadístico y de *machine learning* no supervisado (clustering).

Asimismo, el enfoque cuantitativo garantiza la reproducibilidad de los resultados y la formulación de conclusiones basadas en evidencia empírica, en concordancia con la naturaleza del fenómeno estudiado y con el objetivo de orientar decisiones sobre focalización de recursos públicos y privados. (Olaya, 2016)

Alcance de la investigación

La investigación tiene un **alcance descriptivo y aplicado**.

Es **descriptiva** porque busca identificar y caracterizar grupos de municipios colombianos que presentan condiciones similares de pobreza multidimensional, a partir del análisis de variables relacionadas con educación, salud, vivienda, servicios públicos y composición del hogar. No se

pretende establecer relaciones causales, sino describir los patrones existentes entre las dimensiones consideradas. (Caloca, Leriche, & Martínez, 2017).

El estudio es **aplicado**, en tanto que los resultados obtenidos se proyectan hacia la formulación de un modelo que sirva como herramienta de apoyo para la **focalización estratégica de intervenciones sociales**, optimizando la distribución de recursos limitados bajo un marco analítico complementado por principios de teoría de juegos. (Monsalve, 2003).

Diseño de la investigación

El diseño metodológico es **no experimental, transversal y de carácter exploratorio-aplicado**.

Es **no experimental** porque no existe manipulación deliberada de las variables analizadas; se trabaja con datos previamente recolectados por el **Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)** a través de la **Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2024**.

El diseño es **transversal**, ya que la información se analiza en un único momento del tiempo correspondiente al año 2024. (DANE, Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV, 2024).

Finalmente, se considera **exploratorio-aplicado** porque se emplean técnicas de *machine learning* para descubrir estructuras subyacentes en los datos (agrupamientos o clusters) y se busca aplicar estos resultados en la generación de conocimiento útil para la toma de decisiones en política pública y desarrollo territorial. (Rousseeuw & Kaufman, 1990).

Síntesis de la sección

Elemento	Tipo / Enfoque	Justificación
Enfoque	Cuantitativo	Uso de datos numéricos y métodos estadísticos/algorítmicos.
Alcance	Descriptivo y aplicado	Se describen patrones de pobreza y se propone una aplicación práctica.
Diseño	No experimental, transversal, exploratorio-aplicado	Se analizan datos secundarios (ECV 2024) en un solo momento, sin manipular variables.

Fuente: Elaboración propia con base en (Tamayo, 2001).

Definición de variables

La definición de variables permite precisar los atributos que serán analizados en el estudio para caracterizar las condiciones de pobreza multidimensional en los municipios colombianos. Dado que la investigación adopta un enfoque cuantitativo y de tipo no experimental, las variables corresponden a dimensiones observables derivadas de los módulos temáticos de la **Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2024** del **DANE**, la cual constituye una fuente oficial de información sobre condiciones de vida y acceso a servicios en el país. (Bollen, 1989).

En este estudio se seleccionaron cinco módulos —**vivienda, salud, educación, fuerza de trabajo y composición del hogar**—, ya que son los que contienen la variable de identificación municipal y permiten representar las dimensiones fundamentales del **Índice de Pobreza Multidimensional (IPM)**. (DANE, Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV, 2024).

Las variables no se clasifican como dependientes o independientes, dado que el análisis se realiza mediante técnicas de aprendizaje no supervisado (*clustering*), enfocadas en la

identificación de patrones de similitud entre municipios. (Angulo Salazar, Díaz Cuervo, & Pardo Pinzón, 2016).

Población y muestra

En este estudio, la información se basa en fuentes secundarias, por lo cual la delimitación de la población no depende de procesos de muestreo en campo, sino de los datos disponibles en la **Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2024**. (DANE, Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV, 2024).

Población

La **población objetivo** corresponde a los **hogares y personas residentes en los municipios de Colombia** que fueron incluidos en la **ECV 2024**, los cuales representan las condiciones socioeconómicas y de bienestar de la población nacional. Para efectos del estudio, se consideran los **municipios** como la **unidad de análisis**, en tanto que el propósito es identificar patrones de pobreza multidimensional a nivel territorial. En total, la ECV 2024 cubre aproximadamente **1.102 municipios** y **32 departamentos**, con representatividad nacional, urbana y rural. (Cuervo & González, 2014).

Muestra

La **muestra de análisis** corresponde al conjunto de municipios que cuenten con información disponible, completa y coherente en los módulos seleccionados de la ECV 2024 (**vivienda, salud, educación, fuerza de trabajo y composición del hogar**).

Dado que se trata de un proceso de integración de bases y que no todas las variables

presentan cobertura total, se adoptará un **muestreo no probabilístico por conveniencia**, utilizando únicamente los municipios con registros válidos y consistentes. En caso de que algunos municipios presenten vacíos o inconsistencias de información en más de una dimensión, serán excluidos del análisis para garantizar la calidad estadística del modelo. (Tamayo, 2001).

Nivel de análisis y agregación

El estudio trabajará con información agregada a nivel municipal, lo que implica consolidar variables individuales o de hogar mediante promedios, proporciones o tasas representativas del municipio. Esta estrategia permite analizar la pobreza multidimensional desde una perspectiva territorial, manteniendo la comparabilidad entre unidades. (Guerrero Dávila & Guerrero Dávila, 2014).

Fuentes de información

La fuente principal de datos será la **Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2024** del DANE, que recoge información sobre condiciones de vida, acceso a servicios, educación, salud y empleo. (DANE, Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV, 2024).

Las bases específicas utilizadas son:

- F1: Datos de la vivienda
- F9: Características y composición del hogar
- F22: Salud

- F24: Educación
- F12: Fuerza de trabajo

Segundo nivel

Conceptualización del uso de modelos, referentes y técnicas particulares

La investigación combina técnicas de **aprendizaje automático no supervisado (clustering)** con principios de la **teoría de juegos**, con el propósito de identificar y clasificar municipios colombianos de acuerdo con sus condiciones de pobreza multidimensional y analizar, desde una perspectiva estratégica, la asignación de recursos entre actores públicos y privados. (Monsalve, 2003)

El **clustering**, particularmente el algoritmo **K-means**, se selecciona por su efectividad para agrupar observaciones con características similares y su amplia aplicación en estudios socioeconómicos. Este método permite descubrir patrones en los datos sin variables dependientes, generando agrupaciones de municipios con perfiles comparables de privación. (Muñetón-Santa & Manrique-Ruiz, 2023)

La **teoría de juegos**, por su parte, se incorpora como marco analítico complementario que permitirá interpretar los resultados del *clustering* desde la interacción entre los distintos actores involucrados en la política social. Así, el modelo integra una dimensión empírica (análisis de datos) y una dimensión estratégica (asignación óptima de recursos en escenarios de cooperación o competencia). (Serrano Moya, 2006)

Componentes funcionales del modelo aplicado

El modelo propuesto se desarrolla en cinco etapas principales (Tamayo, 2001):

1. **Integración de información:** consolidación de los módulos de la **Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2024** relacionados con vivienda, educación, salud, fuerza de trabajo y composición del hogar.
2. **Depuración y normalización:** verificación de consistencia, tratamiento de valores vacíos y estandarización de variables para asegurar comparabilidad entre municipios.
3. **Aplicación del algoritmo K-means:** agrupamiento de municipios según similitud de indicadores, definiendo el número óptimo de clusters mediante criterios de validación interna (método del codo y coeficiente de Silhouette).
4. **Validación e interpretación:** revisión de la coherencia estadística y territorial de los grupos obtenidos, identificando tipologías de municipios con patrones de privación similares.
5. **Análisis estratégico:** vinculación de los resultados con los principios de la teoría de juegos para analizar posibles escenarios de cooperación o competencia en la distribución de recursos.

Instrumentos de recolección de información

La información se obtiene de la **Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV) 2024**, desarrollada por el **DANE** (DANE, Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV, 2024), la cual constituye un instrumento oficial, validado y representativo a nivel nacional, departamental y municipal. Los módulos seleccionados (vivienda, salud, educación, fuerza de trabajo y composición del hogar) contienen variables que reflejan las dimensiones del **Índice de Pobreza Multidimensional (IPM)** (DANE, Pobreza multidimensional en Colombia 2024, 2024).

El procesamiento y análisis de los datos se realizarán mediante herramientas tecnológicas de análisis cuantitativo, principalmente **Python** (Pandas, NumPy, Scikit-learn) para limpieza y modelado, y **Excel o Power BI** para verificación y visualización. Al tratarse de información secundaria, no se aplicarán instrumentos de recolección directa, aunque se llevará a cabo una verificación interna de calidad para garantizar la confiabilidad de las variables empleadas. (Ali, 2024).

Técnicas de análisis de datos

El análisis se desarrollará mediante procedimientos de **estadística descriptiva** y **aprendizaje automático**.

Inicialmente, se aplicarán medidas de resumen y gráficos exploratorios para evaluar la distribución y coherencia de los datos. Posteriormente, se implementará el algoritmo **K-means** para clasificar los municipios, validando los resultados con el **método del codo** y el **coeficiente de Silhouette**. (Alkire S. , y otros, 2015). Los grupos identificados se interpretarán en función de sus características predominantes y se representarán de manera geográfica. Finalmente, se realizará una **reflexión estratégica basada en la teoría de juegos**, orientada a comprender cómo los distintos actores pueden interactuar de forma cooperativa o competitiva en la asignación de recursos hacia los municipios priorizados. (Villegas, 2016).

El diseño metodológico propuesto articula información estadística oficial con técnicas de análisis de datos modernas y un marco conceptual estratégico. Esta integración permite garantizar la coherencia entre los objetivos de la investigación, las variables seleccionadas y las herramientas empleadas, sentando las bases para un análisis riguroso y aplicable de la pobreza multidimensional en el contexto colombiano. (Díaz, y otros, 2023).

Análisis y discusión de resultado

El presente apartado expone los principales resultados obtenidos a partir del análisis de las dimensiones de pobreza multidimensional en los municipios colombianos (Ariza & Retajac, 2022) y su posterior segmentación mediante técnicas de *machine learning* no supervisado. Los hallazgos se presentan de acuerdo con los objetivos específicos del estudio y se interpretan a la luz del marco teórico desarrollado. Asimismo, se discuten las implicaciones de estos resultados para la focalización de políticas públicas y la asignación estratégica de recursos, integrando el enfoque de *clustering* con los principios de la teoría de juegos como herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

Análisis de la pobreza multidimensional en los municipios colombianos

El análisis de la pobreza multidimensional en los municipios colombianos se fundamentó en un conjunto de variables seleccionadas por su capacidad para reflejar dimensiones clave del bienestar. A partir de la base construida con información municipal, se incluyeron indicadores relacionados con educación, salud, empleo y condiciones de vida, que permiten capturar la heterogeneidad territorial del país y aproximarse al enfoque multidimensional del DNP y la metodología Alkire-Foster. (DANE, Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV, 2024).

Entre las variables consideradas se incluyeron alfabetismo (alfabetismo), nivel educativo alcanzado (nivel_educativo), afiliación al sistema de salud (afiliado_salud), satisfacción con los ingresos y la vida actual (satis_ingreso, satis_vida), condición campesina (campesino_autoid, campesino_comunidad), tipo de subsidio recibido (subsidiado) y medio de transporte principal (transporte_principal), (DANE, Pobreza multidimensional en Colombia 2024, 2024). Estas preguntas fueron seleccionadas por su relevancia empírica para describir el bienestar individual

y comunitario, además de estar disponibles de manera uniforme para todos los municipios, lo que garantiza su comparabilidad estadística.

Los resultados muestran que los municipios rurales concentran un mayor nivel de privaciones simultáneas: menor cobertura educativa, menores tasas de afiliación al sistema de salud y alta dependencia de subsidios estatales, mientras que los municipios urbanos presentan mejores indicadores de acceso y percepción de bienestar. Este comportamiento evidencia la permanencia de desigualdades territoriales, especialmente en el Caribe, el Pacífico y la Orinoquía, donde las limitaciones en infraestructura, empleo y educación reproducen ciclos de pobreza estructural. (Grisales Aguirre, 2020).

<i>Tipo de municipio</i>	<i>Pobreza Monetaria (% 2022)</i>	<i>Tasa de Desempleo (% 2023)</i>	<i>Acceso a Acueducto (% 2022)</i>	<i>Cobertura de Educación Media (% 2022)</i>
<i>Grandes Ciudades / Áreas Metrop.</i>	31.6%	10.2%	97.4%	61.9%
<i>Intermedio (Resto Urbano)</i>	40-45% (Aprox.)	10-14% (Aprox.)	85-95% (Aprox.)	50-60% (Aprox.)
<i>Rural y Rural Disperso</i>	56.6%	5-8% (Aprox.)	57.1%	31.5%

Fuente: elaboración propia con base en (DNR, 2023).

Estos resultados respaldan lo planteado por Alkire y Foster y la (FAO, 2023), al confirmar que la pobreza en Colombia no se explica únicamente por la falta de ingresos, sino por la acumulación de privaciones en múltiples dimensiones del bienestar. Las brechas documentadas entre tipos de municipios reflejan la urgencia de políticas públicas focalizadas y territoriales que aborden simultáneamente las desigualdades en educación, servicios y empleo. (Ramos, Ballestar, Komp-Leukkunen, & Sainz, 2025).

Resultados del modelo de clustering

El análisis de agrupamiento territorial se realizó utilizando el algoritmo K-Means, con el propósito de clasificar los municipios colombianos según sus condiciones de pobreza multidimensional. La base consolidada incluyó 1.036 municipios, representados por variables socioeconómicas extraídas y depuradas a partir de la Encuesta Nacional de Calidad de Vida (DANE, Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV, 2024), relacionadas con las dimensiones de educación, salud, vivienda, empleo y percepción de bienestar.

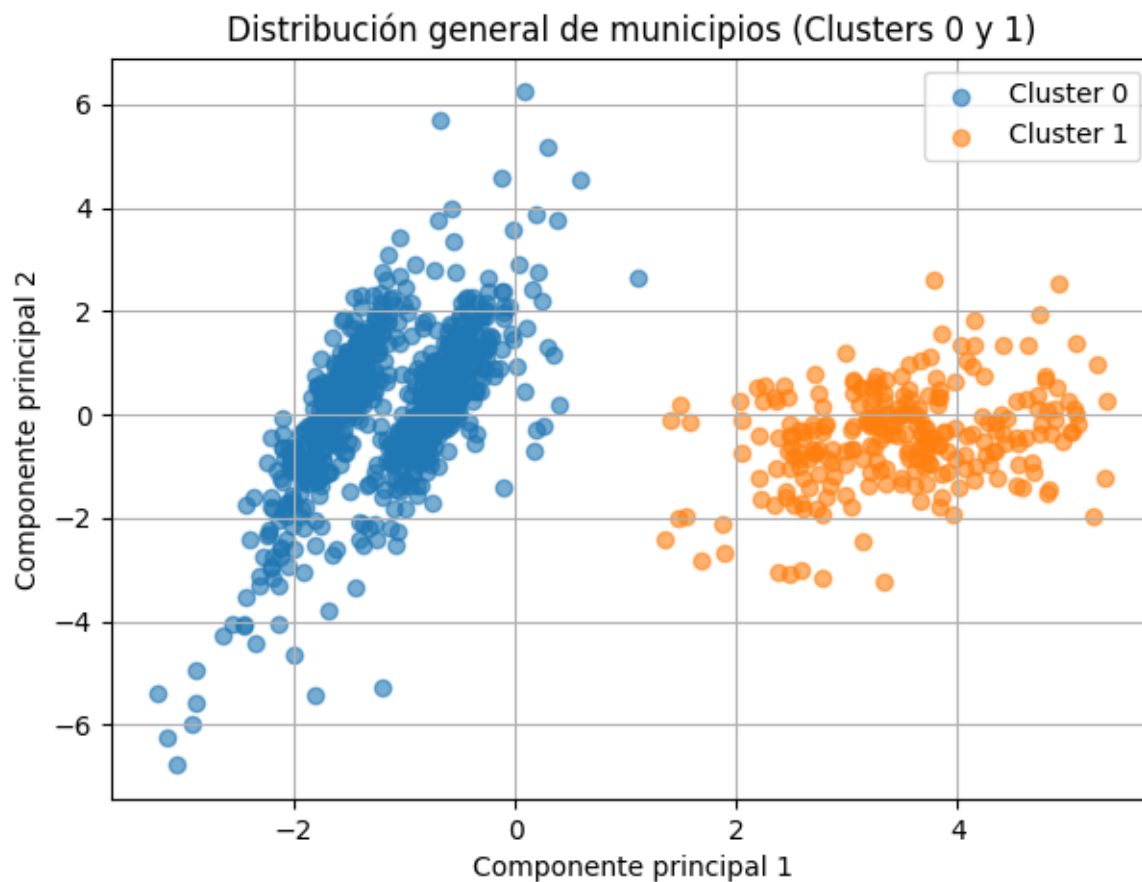
Todas las variables fueron normalizadas mediante StandardScaler para garantizar la comparabilidad entre dimensiones y unidades de medida. El número óptimo de grupos se determinó a partir del método del codo y del coeficiente de Silhouette (Bell, 2015), estableciendo $K = 2$ como la configuración más adecuada para reflejar patrones diferenciados de bienestar.

Segmentación general de municipios

El modelo permitió distinguir dos grandes clusters que representan contrastes significativos en las condiciones de vida de los municipios del país.

<i>Cluster</i>	<i>Municipios</i>	<i>Características predominantes</i>	<i>Interpretación</i>
0 (<i>Vulnerable</i>)	782	Menores niveles de satisfacción con vida e ingreso, mayor dependencia de subsidios y menor cobertura en salud y educación.	Municipios con condiciones estructurales de vulnerabilidad.
1 (<i>Favorable</i>)	254	Mejores indicadores de educación, afiliación en salud y percepción de bienestar.	Municipios con condiciones socioeconómicas más estables.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del modelo K-Means, 2025



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del modelo K-Means, 2025

La representación bidimensional mediante *PCA (Componentes Principales)* evidencia una separación nítida entre ambos grupos, lo que confirma la capacidad del modelo para identificar patrones estructurados en los datos. Esta clasificación coincide con los resultados de (Wahyuni S. D., 2025), quien al aplicar K-Means para estudiar la pobreza regional en Indonesia, halló divisiones similares entre territorios de alta y baja vulnerabilidad social.

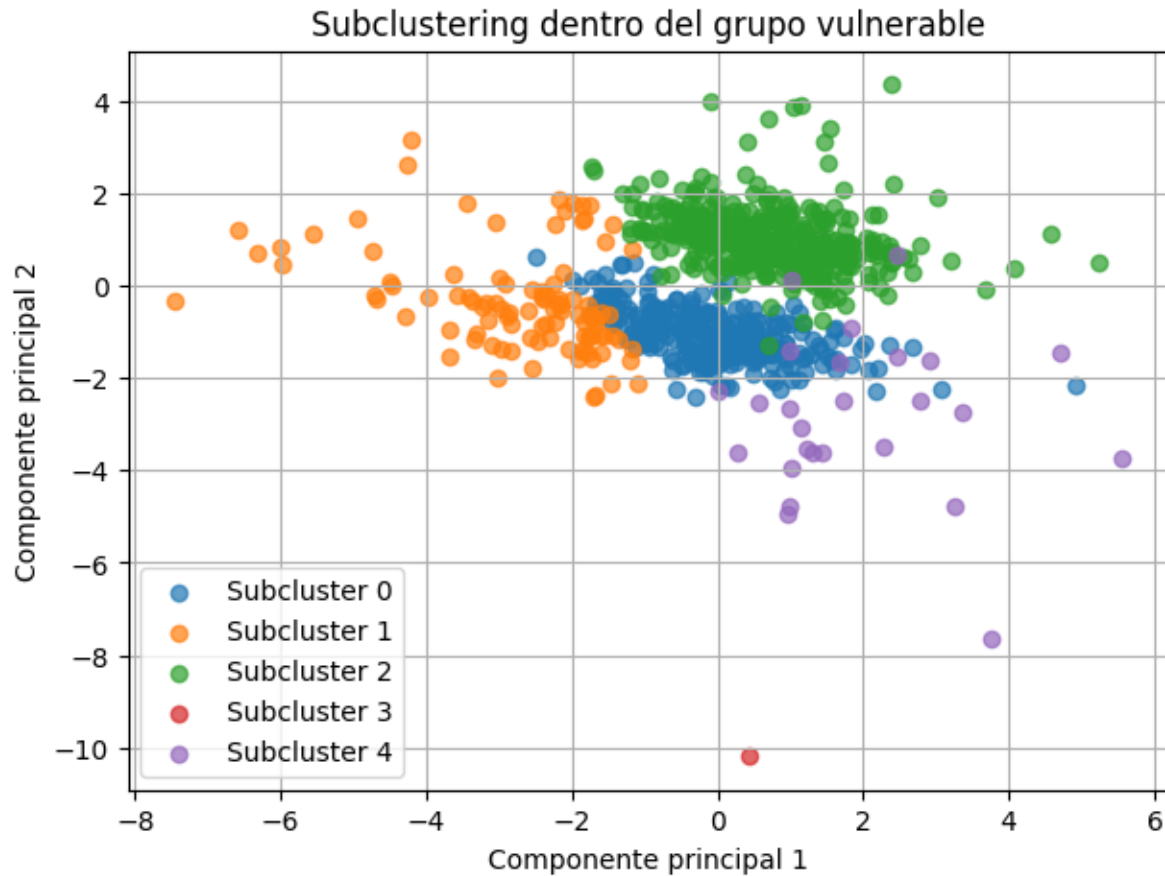
Subclustering dentro del grupo vulnerable

Con el fin de profundizar en las diferencias internas, se aplicó un segundo modelo de K-Means exclusivamente sobre los municipios pertenecientes al Cluster 0 (vulnerable). El análisis del coeficiente de Silhouette (0.243) y las pruebas de estabilidad indicaron que la

configuración óptima correspondía a K = 5 subclusters, lo que permitió identificar cinco tipologías distintas de vulnerabilidad territorial.

<i>Subcluster</i>	<i>Municipios</i>	<i>Perfil dominante</i>	<i>Tipo de intervención sugerida</i>
<i>0 – Déficit en salud y acceso</i>	272	Baja afiliación, mala calidad EPS, alta dependencia de subsidios.	Refuerzo sanitario y acceso a servicios básicos.
<i>1 – Brecha educativa estructural</i>	102	Bajo alfabetismo y menor satisfacción general.	Programas de educación rural y formación técnica.
<i>2 – Vulnerabilidad mixta</i>	381	Rezago moderado y baja percepción de bienestar.	Estrategias integrales de bienestar comunitario.
<i>4 – Casos críticos multidimensionales</i>	26	Peores indicadores en todas las dimensiones.	Atención prioritaria multisectorial.
<i>3 – Municipio atípico</i>	1	Caso singular, patrón único.	Evaluación individual.

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del modelo K-Means, 2025



Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del modelo K-Means, 2025

Promedios de las variables por subcluster

El análisis de los centroides mostró diferencias significativas entre los grupos, especialmente en indicadores de satisfacción, afiliación al sistema de salud y dependencia de subsidios. Estos resultados permiten caracterizar con mayor precisión las particularidades de cada tipología de vulnerabilidad.

Fila	Subcluster	Satis. Vida	Satis. Ingreso	Satis. Salud	Afiliado Salud	Calidad EPS	Campesino Autoid.
2	0	8.38	19.62	7.80	0.00	0.00	1.32
3	1	7.35	17.21	6.75	0.16	0.36	1.37
4	2	8.24	20.20	7.81	1.00	2.41	1.35
5	3	10.00	99.00	3.00	0.00	0.00	2.00
6	4	8.59	13.96	8.39	0.35	0.73	1.77

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo de subclustering (2025).

La comparación revela que el Subcluster 4 agrupa los municipios con las condiciones más críticas —menor ingreso percibido, baja calidad en salud y alta dependencia de subsidios—, mientras que el Subcluster 2 presenta condiciones relativamente mejores en salud y bienestar, aunque con rezagos moderados.

Discusión e interpretación de los resultados

Los resultados confirman que la pobreza multidimensional en Colombia tiene una estructura territorial heterogénea y jerarquizada, en la que coexisten diferentes niveles y tipos de privación. La existencia de cinco subgrupos dentro del conjunto vulnerable demuestra que las condiciones de pobreza no son uniformes y requieren intervenciones diferenciadas según el perfil territorial de cada municipio. (Ariza B. & Retajac, 2020).

Estos hallazgos respaldan los postulados de (Alkire & Foster, 2011) sobre la necesidad de medir simultáneamente la intensidad y la incidencia de la pobreza, así como las conclusiones de (Wahyuni S. , 2025) respecto al valor del *clustering* para clasificar unidades geográficas con base en características socioeconómicas comunes.

La segmentación obtenida constituye una herramienta operativa para la focalización de políticas públicas, al permitir identificar municipios prioritarios y definir estrategias específicas de atención. Además, servirá como insumo para el desarrollo del modelo de asignación estratégica de recursos basado en teoría de juegos, abordado en el siguiente apartado, en el cual los grupos identificados actuarán como agentes interdependientes en la búsqueda de equilibrios eficientes bajo limitaciones presupuestarias. (Rueda Varon, Moya-Moya, & Aranda-Silva, 2011).

Análisis estratégico basado en teoría de juegos para la focalización de recursos

El análisis estratégico busca establecer un marco de decisión racional que complemente los resultados del *clustering*, orientando la asignación eficiente de recursos entre los municipios identificados según su nivel de vulnerabilidad. La teoría de juegos ofrece un enfoque analítico idóneo para este propósito, al modelar escenarios en los que diferentes actores —como el Estado, los gobiernos locales y la sociedad civil— toman decisiones interdependientes bajo condiciones de recursos limitados. (Govaert & Nadif, 2014).

Siguiendo a Nash (Monsalve, 2003), un equilibrio se alcanza cuando cada jugador selecciona la estrategia que maximiza su utilidad, dadas las decisiones de los demás, y ninguno tiene incentivos para desviarse unilateralmente. Este principio resulta especialmente pertinente en la gestión pública, donde las decisiones de inversión o cooperación de un actor influyen directamente en los resultados de los otros. En este contexto, el Gobierno Central actúa como asignador principal de recursos, mientras que los gobiernos locales y el sector social o privado desempeñan el papel de ejecutores o cofinanciadores de las intervenciones territoriales.

Planteamiento del escenario estratégico

Los resultados del modelo de *clustering* permiten definir grupos de municipios con diferentes necesidades y capacidades institucionales. Por ejemplo, los subclusters 0 y 4, identificados como

los más críticos, demandan una intervención intensiva en salud, educación y servicios básicos, mientras que el subcluster 2 —con vulnerabilidad moderada— puede participar activamente en esquemas de cofinanciación o desarrollo productivo. Bajo esta lógica, la distribución del gasto público se convierte en un juego estratégico de coordinación, donde el objetivo común es maximizar el bienestar social sujeto a restricciones presupuestarias y operativas. (Rousseuw & Kaufman, 1990).

Modelo de decisión tipo equilibrio de Nash

Los resultados del *clustering* mostraron que los municipios colombianos se agrupan en diferentes niveles de vulnerabilidad: algunos con carencias estructurales severas (Subcluster 4 y 0), y otros con mejores condiciones relativas (Subcluster 1 y 2). Este escenario genera un dilema distributivo clásico para el Gobierno Central: cómo asignar recursos limitados sin sacrificar la equidad ni la eficiencia global del sistema. (Govaert & Nadif, 2014).

Desde la perspectiva de la teoría de juegos, este problema puede representarse como una interacción estratégica entre dos actores principales:

1. El Gobierno Central (Jugador 1), que busca maximizar el bienestar agregado nacional optimizando el presupuesto.
2. Los Municipios (Jugador 2), especialmente los más vulnerables, que buscan aumentar su asignación presupuestaria para mejorar sus indicadores sociales y, en consecuencia, elevar el promedio nacional.

El conflicto surge porque la mejora en los municipios más rezagados eleva la media nacional, pero también reduce la disponibilidad de recursos para los municipios más desarrollados. Si el Gobierno mantiene una asignación igualitaria (según población o ingreso), el promedio de

bienestar se mantiene bajo; pero si redistribuye estratégicamente más recursos hacia los grupos críticos, se acelera la convergencia social a costa de cierta tensión política. (Monsalve, 2003).

A continuación, se presenta una matriz de decisión simplificada para ilustrar el dilema de política pública:

<i>Estrategias</i>	<i>Municipio vulnerable: Demanda activa de recursos</i>	<i>Municipio vulnerable: Colabora en optimización</i>
<i>Gobierno central: Asignación uniforme</i>	(4,6) – Escenario ineficiente: equidad aparente, promedio nacional estancado.	(6,7) – Mejora parcial, sin cambios estructurales.
<i>Gobierno central: Asignación focalizada</i>	(8,8) – Equilibrio cooperativo: aumento del promedio nacional y reducción de brechas.	(7,5) – Menor retorno si no hay participación activa del municipio.

Fuente: Elaboración propia con base en (Ricart, 1988).

El equilibrio de Nash se alcanza en la estrategia (Asignación focalizada – Demanda activa), donde el Gobierno destina recursos adicionales a los subclusters con peores indicadores, y los municipios implementan acciones complementarias (cofinanciación, participación local o eficiencia en gasto). En este punto, ninguno de los actores tiene incentivos para desviarse unilateralmente: el Gobierno mejora su promedio nacional y los municipios logran avances sostenibles en bienestar. (Ricart, 1988).

Este equilibrio es económicamente eficiente y socialmente legítimo, pues responde a lo que (Monsalve, 2003), denomina el principio del “máximo esfuerzo posible” en el uso del presupuesto público: el Estado prioriza a los más rezagados mientras mantiene la estabilidad fiscal.

Ejemplo aplicado: 20 municipios de Antioquia pertenecientes al Cluster 2 (vulnerabilidad moderada)

Para ilustrar la utilidad práctica del modelo, se tomó como caso de referencia un grupo de 20 municipios del departamento de Antioquia clasificados dentro del Cluster 2 (vulnerabilidad moderada), entre ellos Amagá, Amalfi, Andes, Anorí, Arboletes, Argelia, Barbosa, Betania, Cáceres, Caicedo, Caramanta, Carolina del Príncipe, Chigorodó, Dabeiba, Donmatías, El Bagre, Frontino, Jardín, La Pintada y La Unión.

En conjunto, estos municipios administran presupuestos anuales que ascienden aproximadamente a 1,2 billones de pesos colombianos, con un promedio cercano a 60 mil millones de pesos por municipio. Sin embargo, las diferencias internas son considerables: mientras Caramanta y Caicedo manejan presupuestos inferiores a 8 mil millones anuales, El Bagre supera los 140 mil millones, principalmente por ingresos derivados de regalías mineras (corrupcionaldía, 2024).

Estos contrastes reflejan las asimetrías estructurales que el modelo de *clustering* ayuda a evidenciar: municipios con condiciones socioeconómicas similares pueden enfrentar resultados presupuestales muy dispares, producto de su capacidad fiscal, actividad económica o eficiencia en la gestión pública.

A futuro, y de acuerdo con los lineamientos de política fiscal del Gobierno de Antioquia (antioquia.gov.co, 2024), mejorar el promedio presupuestal de estos municipios requerirá fortalecer las finanzas locales y aplicar una asignación focalizada del gasto, coherente con los hallazgos del modelo.

Si los municipios más rezagados del cluster logran aumentar su ingreso propio, optimizar el gasto y acceder a mayores transferencias de la Nación, el promedio presupuestal del grupo podría elevarse de 60 a cerca de 75 mil millones anuales, generando un impacto positivo en indicadores de educación, salud e infraestructura social.

Este ejercicio demuestra que la estrategia de focalización basada en teoría de juegos propuesta en el modelo no solo es teóricamente sólida, sino también operativamente viable: al dirigir mayores recursos hacia los municipios más críticos del grupo, se elevaría el bienestar agregado sin comprometer la sostenibilidad fiscal, acercando el desempeño medio de Antioquia a los objetivos nacionales de equidad territorial y desarrollo sostenible.

Implicaciones para el modelo propuesto

Bajo esta lógica, los resultados del *clustering* permiten cuantificar los incentivos óptimos para alcanzar equilibrios similares.

Por ejemplo, los municipios del Subcluster 4 —identificados como casos críticos multidimensionales— deberían recibir una mayor proporción del presupuesto per cápita hasta alcanzar el punto de retorno marginal decreciente, momento en el cual el incremento del gasto deja de mejorar significativamente el promedio nacional.

Los municipios del Subcluster 2, con vulnerabilidad moderada, podrían integrarse en esquemas de cofinanciación o colaboración público–privada, reduciendo la carga fiscal del Estado y aumentando la eficiencia del gasto.

En este sentido, el equilibrio de Nash no se limita a una noción teórica, sino que se convierte en un instrumento operativo para priorizar políticas públicas, donde cada grupo de municipios representa un jugador que reacciona a los incentivos presupuestarios y donde el éxito global depende de la cooperación racional entre niveles de gobierno. (Ricart, 1988).

Discusión general e integración de resultados

La investigación demuestra que la pobreza en Colombia no solo es multidimensional, sino también profundamente territorial. Los resultados del *clustering* evidenciaron la existencia de grupos de municipios con privaciones estructurales diferenciadas, mientras que la aplicación de

la teoría de juegos permitió traducir esos hallazgos en un marco estratégico de asignación de recursos, (Wahyuni S. D., 2025). La integración de ambos enfoques —empírico y estratégico— ofrece una herramienta innovadora para la focalización de políticas públicas. No obstante, el modelo presenta limitaciones asociadas a la disponibilidad y actualización de datos municipales, así como a la simplificación de las interacciones institucionales en el análisis teórico, (Ariza B. & Retajac, 2020). Pese a ello, su valor metodológico reside en proporcionar un esquema replicable y adaptable a distintos niveles territoriales, coherente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 1 y 10), orientados a la erradicación de la pobreza y la reducción de desigualdades.

Conclusiones

Esta investigación ha demostrado que la integración de técnicas de machine learning no supervisado con principios de teoría de juegos ofrece un marco analítico robusto para abordar la pobreza multidimensional desde una perspectiva territorial y estratégica. El modelo desarrollado permite no solo identificar patrones de privación en municipios colombianos, sino también proponer un esquema de asignación de recursos que optimice el impacto social bajo condiciones de escasez.

Los resultados del clustering confirmaron la existencia de grupos de municipios con perfiles diferenciados de vulnerabilidad, lo que refuerza la necesidad de intervenciones focalizadas y diseñadas según las carencias predominantes en cada territorio. La segmentación en subclusters dentro del grupo vulnerable evidenció que la pobreza multidimensional no es un fenómeno homogéneo, sino que presenta matices que demandan respuestas de política igualmente diferenciadas.

Por otro lado, la incorporación de la teoría de juegos —a través del concepto de equilibrio de Nash— permitió transitar de un diagnóstico descriptivo a un marco decisional estratégico, en el que actores públicos y privados pueden interactuar de manera coordinada para maximizar el

bienestar social dentro de restricciones presupuestarias. Este enfoque integrador representa una alternativa promisorio para mejorar la eficiencia y legitimidad en la distribución de recursos, sin depender exclusivamente de criterios tradicionales de asignación.

Si bien el modelo se sustenta en datos oficiales y metodologías validadas, su aplicabilidad en contextos reales dependerá de factores como la disponibilidad de información actualizada, la capacidad institucional para implementar enfoques basados en datos y la voluntad de los actores para adoptar lógicas de cooperación estratégica. Futuras líneas de investigación podrían explorar la incorporación de dinámicas temporales, el escalamiento del modelo a nivel departamental o la inclusión de variables ambientales y de cambio climático.

En síntesis, este estudio aporta una ruta metodológica innovadora para la priorización de intervenciones en pobreza multidimensional, con potencial de replicación en otros contextos socio territoriales. Su principal valor radica en la articulación entre evidencia cuantitativa y pensamiento estratégico, ofreciendo un camino viable para traducir el análisis de datos en decisiones de política pública más informadas, equitativas y efectivas.

Referencias

- Ali, M. (11 de September de 2024). *Las 26 mejores bibliotecas Python para la Ciencia de Datos en 2024*. Obtenido de Datacamp: <https://www.datacamp.com/es/blog/top-python-libraries-for-data-science>
- Alkire, & Foster. (2011). Counting and multidimensional poverty measurement. *Journal of Public Economics*, 476–487.
- Alkire, S., Foster, J., Seth, S., Santos, M. E., Roche, J. M., & Ballon, P. (2015). he Alkire-Foster Counting Methodology. In *Multidimensional Poverty Measurement and Analysis*. Oxford University Press, Chapter 5.
- Angulo Salazar, R. C., Díaz Cuervo, Y., & Pardo Pinzón, R. (2016). Índice de Pobreza Multidimensional para Colombia (IPM-Colombia). *Archivos de Economía*, Documento 382. Departamento Nacional de Planeación.
- Ariza B., J. F., & Retajac, A. (2020). *Pobreza monetaria y multidimensional en Colombia : medición, evolución y determinantes*. Sello Editorial Universidad del Tolima.
- Ariza, J., & Retajac, A. (2022). Pobreza monetaria y multidimensional en Colombia: Medición, evolución y determinantes. *Universidad del Tolima*, 123-134.
- Bell, J. (2015). *Machine learning : hands-on for developers and technical professionals*. Wiley.
- Bollen, K. A. (1989). *Structural Equations with Latent Variables*. John Wiley & Sons.
- Caloca, O., Leriche, C., & Martínez, N. (2017). La pobreza desde las teorías de Ricardo y Sen. *Análisis Económico*.
- Corti, H. (2017). Las restricciones presupuestarias en la jurisprudencia de la Corte Suprema de Justicia Argentina. *Lex Social*, 144-169.
- Cuervo, L., & González, J. (2014). Dimensiones territoriales de la pobreza en Colombia: una mirada desde los municipios. En U. N. Colombia., *Revista de la Facultad de Ciencias Económicas*.
- DANE. (2024). *Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV*. Obtenido de DANE: <https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/861/study-description>
- DANE. (2024). *Pobreza multidimensional en Colombia 2024*. Colombia: DANE.
- Díaz, Y., Narváez, L., Moreno, J., Gaitán, A., Muñoz, D., & Juvinao, C. (2023). Las dimensiones faltantes de la pobreza: Propuesta de un Índice de Pobreza Multidimensional Ampliado para Bogotá. *Secretaría Distrital de Planeación*.
- DNR. (2023). *Clasificación y brechas documentadas entre áreas urbanas y rurales*.
- FAO. (2023). *Panorama de la pobreza rural en América Latina y el Caribe*. Santiago: CEPAL-FAO.
- Govaert, G., & Nadif, M. (2014). *Co-Clustering : models, algorithms and applications*. ISTE.

- Grisales Aguirre, A. (2020). *Método clúster para clasificar y pronosticar perfiles de pobreza multidimensional en las cabeceras municipales de Colombia*. Barranquilla: Universidad Simon Bolivar.
- Guerrero Dávila, G., & Guerrero Dávila, M. C. (2014). *Metodología de la investigación*. Larousse - Grupo Editorial Patria.
- Guerrero Salas, H., Mayorga Morato, M. A., & Suárez, O. A. (2024). *Teoría de la decisión aplicada: análisis de decisiones bajo incertidumbre, riesgo, teoría de los juegos y cadenas de Markov*. Ecoe Ediciones.
- Gutiérrez, Cortés, & Montaña. (2020). La Pobreza Multidimensional y su relación con el espacio: Caso de estudio para Colombia. *Revista Visión Contable*, 78-100.
- Iwasawa, H., Ueno, T., Masui, T., & Tajima, S. (2022). Unsupervised clustering for identifying spatial inhomogeneity on local electronic structures. *Nature Publishing Group*, 9(1), 17.
- Jay Vanegas, W., Padilla Santamaria, M. G., & Rodelo Molina, M. K. (2024). Políticas públicas ante la revolución de la inteligencia artificial en Colombia. *Revista Venezolana De Gerencia*, 865-883.
- Jennings, P. J. (2008). Using Cluster Analysis to Define Geographical Rating Territories. *Casualty Actuarial Society Discussion Paper Program*, 34-52.
- Maleki, J., Masoumi, Z., Hakimpour, F., & Coello, C. A. (2020). A spatial land-use planning support system based on game theory. *Land Use Policy*, 105013.
- Monsalve, S. (2003). John Nash y la teoría de juegos. *Lecturas Matemáticas*, 137–149.
- Muñetón-Santa, G., & Manrique-Ruiz, L. C. (2023). Predicting Multidimensional Poverty with Machine Learning Algorithms: An Open Data Source Approach Using Spatial Data. *Social Sciences*.
- Olaya, L. (2016). Análisis crítico de la pobreza en Medellín y los indicadores multidimensionales. *Universidad de Antioquia*, 22-25.
- Ramos, A., Ballestar, M. T., Komp-Leukkunen, K., & Sainz, J. (2025). DESIGUALDADES DE BIENESTAR EN EUROPA EN FUNCIÓN DEL NIVEL EDUCATIVO: UN ANÁLISIS TRANSNACIONAL Y MULTIDIMENSIONAL CON MACHINE LEARNIN. *apeles de economía española*, 189-318.
- Ricart, J. E. (1988). *Una Introducción a la teoría de lo juegos*. Barcelona: IESE Business School.
- Rousseeuw, P., & Kaufman, L. (1990). *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. John Wiley & Sons, Inc.
- Rueda Varon, M. J., Moya-Moya, L., & Aranda-Silva, M. (2011). Aplicación de técnicas estadísticas multivariadas en perfilación y segmentación. *Universitas Scientiarum*, 254–262.

- Sanders, M., Lawrence, J., Gibbons, D., & Calcraft, P. (2017). El uso de la ciencia de datos en políticas públicas. *The Behavioural Insights Team*, 1-32.
- Serrano Moya, E. D. (2006). Familia y teoría de juegos. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*.
- Stawska, J., Malaczewski, M., & Szymańska, A. (2019). Combined monetary and fiscal policy: the Nash Equilibrium for the case of non-cooperative game. *Ekonomika Istraživanja*, 633-650.
- Tamayo, G. (2001). Diseños muestrales en la investigación. *SEMESTRE ECONÓMICO*.
- Villegas, A. J. (2016). *Juegos Estratégicos y sus aplicaciones*. Bogotá: Universidad de los Andes y Quantil.
- Wahyuni, S. (2025). Identifying Regional Patterns of Poverty in Indonesia: a Clustering Approach Using K-Means. *International Journal of Computer and Information Science*. *International Journal of Computer and Information Science*, 27–35.
- Wahyuni, S. D. (2025). Importance-performance analysis of tourist perceptions on security services and safety facilities in Nusa Penida, Indonesia. *BIO Web of Conferences*, 157.
- Wang, J., & Biljecki, F. (2022). Unsupervised machine learning in urban studies: A systematic review. *Cities*, 103925.