



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas de alimentos en Colombia

Ingrid Rocío Moreno Cupa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de geografía,
Bogotá, Colombia

2025

Análisis de las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas de alimentos en Colombia

Ingrid Rocío Moreno Cupa

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Especialista en Análisis Espacial

Directora:

Nohra León Rodríguez, Ph.D. en Economía

Decana, Facultad de Ciencias Humanas

Universidad Nacional de Colombia

Línea de Investigación:

Geografía económica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de geografía,

Bogotá, Colombia

2025

A Dios, que le da sentido a todo lo que hacemos y somos.

A ti, Gabita, mi mayor alegría, la razón de mis esfuerzos e inspiración de mis sueños.

Este trabajo es para ti, porque en cada logro está tu sonrisa, en cada esfuerzo tu mirada, y en cada lágrima tu manito sosteniéndome.

Quiero que recuerdes siempre que lo desconocido puede parecer misterioso, pero en todo lugar hay magia esperando a ser descubierta, y en tus manos está la fuerza para hacerla brillar con tus propios colores.

Todo lo que soy y todo lo que hago, siempre tendrá un pedacito de ti.

Al amor, que

“Es la causa de la unidad en todas las cosas”...

Aristóteles

Agradecimientos

Agradezco a Dios en primer lugar por proveerme los recursos y darme la fortaleza y la luz para recorrer este camino. A nuestra decana, la Dra. Nohra León Rodríguez, por sus valiosos aportes conceptuales, disposición y paciencia en este proceso. Estimada profe, fuiste fundamental en la construcción de este trabajo. A los profesores José Alejandro Salamanca y Willington Siabato, por sus comentarios y guía, todo mi respeto y admiración. Mi gratitud infinita a Carlos Arturo Téllez, colaborador y compañero de lucha en la UPRA, por sus aportes técnicos en la construcción de esta propuesta.

A mi familia, amigos(as) y compañeros de estudio, por sostenerme con amor y darme ánimo para continuar; a la Universidad Nacional, por exigirme rigurosidad y compromiso en todo momento.

Resumen

Análisis de las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas de alimentos en Colombia

Los precios mayoristas de alimentos en Colombia han sido tradicionalmente analizados desde perspectivas económicas y de mercado. Este estudio propone un enfoque alternativo de carácter territorial y multicriterio para comprender las dinámicas espaciotemporales de los precios, integrando factores socioeconómicos, agroproductivos y biofísicos. En particular, se centra en la papa negra, producto fundamental en la canasta de consumo de los hogares colombianos, con el objetivo de determinar si presenta una marcada variabilidad espacial y temporal, así como patrones diferenciados por región y semestre entre 2019 y 2022.

Para ello se construyó un Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA) a nivel departamental. Este índice incorpora tres dimensiones: producción, abastecimiento mayorista y aptitud del suelo para el cultivo de papa. Fue calculado de manera semestral y vinculado con la evolución de los precios mayoristas en distintas regiones. La metodología combinó procesos de normalización y construcción de indicadores compuestos con análisis de componentes principales (PCA), cartografía temática y técnicas de modelado y análisis espacial.

Los resultados evidencian que entre 2019 y 2022 los precios mayoristas de papa negra en Colombia fueron altamente volátiles, mientras que las capacidades agroproductivas se mantuvieron estables y concentradas en la región andina central. La comparación de ambos indicadores revela que una mayor capacidad agroproductiva no se traduce necesariamente en precios bajos, pues factores como los costos de producción, la intermediación y la concentración de la demanda inciden de manera decisiva en la formación de precios.

En conclusión, el ICA constituye una herramienta conceptual y práctica para interpretar integralmente la relación entre oferta agroproductiva y precios, aportando insumos relevantes para políticas de seguridad alimentaria y ordenamiento productivo.

Palabras clave: precios agrícolas, política agraria y seguridad alimentaria, análisis espacial, análisis por componentes principales (ACP), análisis multicriterio.

Abstract

Analysis of the Spatiotemporal Dynamics of Wholesale Food Prices in Colombia

Traditional analyses of wholesale food prices in Colombia emphasize economic and market factors. This study instead uses a territorial and multicriteria approach, integrating socioeconomic, agro-productive, and biophysical elements to examine spatiotemporal price dynamics for black potato (papa negra)—a Colombian staple—from 2019 to 2022. It aims to determine whether prices display significant spatial and temporal variability and whether distinctive regional or semester-based patterns exist.

To address this, a Departmental Agro-Productive Conditions Index (ICA) was constructed. The index uses three dimensions: production, wholesale supply, and soil suitability for potato cultivation. It was calculated each semester and linked to the evolution of wholesale prices in different regions. The methodology combines normalization and composite indicators with principal component analysis (PCA), thematic cartography, and spatial modeling.

The results show that between 2019 and 2022, black potato wholesale prices in Colombia were highly volatile. In contrast, agro-productive capacities stayed stable and concentrated in the central Andean region. Comparing both indicators reveals that greater agro-productive capacity does not always lead to lower prices. Production costs, market intermediation, and demand concentration also influence price formation.

In conclusion, the ICA emerges as both a conceptual and practical tool to comprehensively interpret the relationship between agro-productive supply and prices, providing relevant insights for food security policies and productive land-use planning.

Keywords: agricultural prices, agrarian policy, food security, spatial analysis, principal component analysis (PCA), multicriteria analysis.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Abstract	VI
Contenido	VII
Lista de figuras	VIII
Lista de abreviaturas	IX
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	3
1.1 Justificación.....	4
1.2 Pregunta de investigación	5
1.2.1 Pregunta principal	5
1.2.2 Preguntas orientadoras	6
1.3 Objeto de la investigación.....	6
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos	7
1.4 Hipótesis o argumento central	7
2. Marco Teórico	8
2.1 Estado del arte	8
2.2 Marco teórico	9
2.2.1 Modelos espaciales aplicados a la agricultura y la determinación de precios	10
2.2.2 Enfoque multicriterio en la estimación de precios agroalimentarios	12
3. Metodología	15
3.1 Fuentes de información	15
3.2 Evaluación Multicriterio Territorial y PCA para el análisis de precios agrícolas	20
3.2.1 Modelo de análisis espacial basado en componentes principales	20
3.2.2 Fases desarrolladas en el modelo metodológico	21
3.2.3 Componentes Principales y construcción del Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA)	24
4. Resultados	27
4.1 Análisis de componentes principales (PCA)	27
4.2 Distribución espacial del Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA)	30
4.3 Autocorrelación espacial global y local	34
5. Conclusiones y recomendaciones	39
Bibliografía	42

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Centrales y mercados mayoristas monitoreados por SIPSA_P – DANE, 2024.....	17
Figura 2. Porcentaje de varianza explicada por cada componente	28
Figura 3. Biplot y heatmap de las cargas de los componentes principales.....	29
Figura 4. Mapas semestrales del Índice de Condiciones Agroproductivas - ICA (2019-2022).....	31
Figura 5. Mapas semestrales de precios mayoristas de papa negra (2019-2022).....	33
Figura 6. Evolución temporal del índice de Moran I del ICA y su significancia estadística, 2019-2022.	35
Figura 7. Evolución de los Cluster LISA del ICA, 2019-2022.....	37

Lista de abreviaturas

Abreviatura Término

<i>AEDE</i>	Análisis Exploratorio Espacial de Dato
<i>AHP</i>	Analytic Hierarchy Process (Análisis Jerárquico de Procesos)
<i>CIC</i>	Capacidad de Intercambio Catiónico
<i>DANE</i>	Departamento Administrativo Nacional de Estadística
<i>EMC</i>	Evaluación Multicriterio
<i>EMC-T</i>	Evaluación Multicriterio Territorial
<i>EVAS</i>	Evaluaciones Agropecuarias Municipales
<i>ICA</i>	Índice de Condiciones Agroproductivas
<i>ICR</i>	Incentivo a la capitalización rural
<i>IPC</i>	Índice de precios al consumidor
<i>IPM</i>	Índice de pobreza multidimensional
<i>LISA</i>	Local Indicators of Spatial Association (Indicadores Locales de Asociación Espacial)
<i>PCA</i>	Principal Component Analysis (Análisis de Componentes Principales)
<i>PC1</i>	Primer componente principal
<i>PC2</i>	Segundo componente principal
<i>PC3</i>	Tercer componente principal
<i>PET</i>	Población en edad de trabajar
<i>SAR</i>	Modelo autorregresivo espacial
<i>SDM</i>	Modelo Durbin espacial
<i>SEM</i>	Modelo del error espacial
<i>SIG</i>	Sistemas de Información Geográfica
<i>SIPRA</i>	Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria
<i>SIPSA</i>	Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario
<i>SIPSA_P</i>	Componente de precios de alimentos del SIPSA
<i>SIPSA_A</i>	Componente de abastecimiento de alimentos del SIPSA
<i>UPRA</i>	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria

Introducción

En Colombia, los precios mayoristas de alimentos inciden de manera directa tanto en la economía nacional como en el bienestar de los hogares, en un país donde la inseguridad alimentaria afecta a una proporción significativa de la población. Su comportamiento refleja no solo dinámicas globales —fluctuaciones del mercado internacional y precios de importación—, sino también factores internos asociados con la oferta: el abastecimiento en mercados mayoristas, la aptitud de los suelos para ciertos cultivos y la producción nacional.

Eventos inesperados como fenómenos climáticos, el conflicto armado en algunas regiones y crisis económicas como la pandemia de COVID-19, han exacerbado la vulnerabilidad de los mercados alimentarios (Ihle et al., 2020). En Colombia, estos choques de oferta impactaron los precios de los principales alimentos consumidos en zonas urbanas, elevando tanto el costo de vida de los hogares como los costos de producción de los agricultores (Niño, Chaparro y Niño, 2023).

La variabilidad de los precios mayoristas de alimentos también se expresa en el territorio. En grandes centros urbanos como Bogotá, Medellín o Cali, la infraestructura de transporte y el acceso a insumos tienden a estabilizar los precios, mientras que en regiones apartadas predominan precios más altos debido a los costos adicionales de distribución y a las restricciones derivadas de la violencia y la inseguridad. Estas disparidades profundizan las brechas en el acceso a los alimentos y afectan especialmente a los hogares más vulnerables, que destinan gran parte de sus ingresos a productos básicos.

En este contexto, el presente análisis espaciotemporal se centra en el caso de la papa negra, un producto fundamental en la dieta de algunas regiones como la andina y con una ponderación relevante dentro del grupo de alimentos y bebidas del IPC (DANE, 2025). Pese a su importancia social y económica, sus precios mayoristas muestran una variabilidad marcada tanto en el tiempo

como en el espacio, lo cual repercute en la planificación productiva, la comercialización y el diseño de políticas públicas.

Este estudio propone un marco analítico que permita comprender estas dinámicas y generar evidencia que contribuya al fortalecimiento de las políticas de seguridad alimentaria y distribución de recursos, con el fin de promover un acceso más estable y equitativo a los alimentos en todo el territorio colombiano.

1. Planteamiento del problema

El análisis de las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas de alimentos en Colombia constituye un tema de alta relevancia socioeconómica. La variabilidad de los precios afecta directamente a consumidores y productores, con implicaciones profundas en la seguridad alimentaria y el bienestar económico de la población (Tomek y Kaiser, 2014).

Si bien existen estudios orientados a identificar patrones de estacionalidad e integración espacial de mercados mediante métodos de econometría, son escasos los trabajos que desarrollan análisis espaciales desde una perspectiva geográfica, combinando el análisis multicriterio con tecnologías de información geográfica para mapear dichas dinámicas.

Históricamente, los precios de los alimentos en el país han fluctuado en función de múltiples factores: variaciones estacionales de la oferta y la demanda, fenómenos climáticos, dinámicas del mercado internacional, políticas públicas relacionadas con la agricultura y el comercio, así como la infraestructura logística y de transporte que condiciona el acceso a los mercados (Castillo, 2007).

Desde la perspectiva ambiental, los precios también están estrechamente ligados a las prácticas agrícolas y a los cambios en los ecosistemas. El cambio climático ha modificado las condiciones de producción, generando escasez de ciertos productos y presionando al alza los precios. En el ámbito político, los precios mayoristas responden a marcos regulatorios vinculados con agricultura, comercio y seguridad alimentaria. En este sentido, el Estado desempeña un papel decisivo en la regulación de mercados, los tratados de libre comercio, los subsidios a la producción, la promoción de infraestructura y las políticas de seguridad alimentaria. Según Tomek y Kaiser (2014), las políticas locales pueden incidir de manera significativa en los precios a través de subsidios, orientaciones agrarias o medidas que afectan la comercialización y distribución.

La variabilidad de los precios tiene consecuencias directas en el poder adquisitivo de los hogares, sobre todo en los sectores más vulnerables. Estas fluctuaciones pueden generar situaciones de inseguridad alimentaria y agravar desigualdades sociales y económicas, en particular cuando las diferencias de precios entre regiones o períodos del año limitan el acceso a alimentos básicos.

De esta manera, un análisis espaciotemporal que integre criterios socioeconómicos, físicos y socioecosistémicos —como los considerados en la construcción de la capa de aptitud para el cultivo comercial de papa elaborada por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA)—, junto con factores de oferta relacionados con la producción y el abastecimiento mayorista, puede contribuir a proponer estrategias orientadas a mitigar estas fluctuaciones y promover mayor equidad social y económica en términos de acceso a alimentos saludables y asequibles.

1.1 Justificación

Pese a la importancia de los precios mayoristas en la economía nacional, la información disponible sobre sus dinámicas espaciotemporales en Colombia sigue siendo limitada (Alonso y Bonilla, 2018). Aún se desconoce en gran medida cómo interactúan los factores geográficos, agroecológicos y temporales en la configuración de patrones de comportamiento, lo que dificulta el diseño de políticas públicas efectivas para mitigar los impactos de la volatilidad en consumidores y productores.

Pese a que existen estudios sobre cadenas agroalimentarias y precios agrícolas, pocos han abordado de manera sistemática la relación entre estas dinámicas y sus condicionantes territoriales. En este contexto, la papa negra constituye un caso estratégico por su papel fundamental en la dieta de los hogares colombianos y su relevancia dentro de los sistemas agroalimentarios andinos.

Este trabajo busca contribuir a llenar dicho vacío mediante una propuesta metodológica que combina herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el Análisis por

Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) en el marco de un modelo multicriterio. Esta integración permite ponderar factores socioeconómicos, biofísicos y socioecosistémicos que inciden en la formación de precios, y representar espacialmente su influencia diferenciada en el territorio.

La articulación de PCA y análisis espaciales a través de herramientas SIG ofrece una perspectiva integral para interpretar las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas, facilitando la identificación de patrones espaciales, zonas críticas y causas subyacentes de su variabilidad. Con ello se busca no solo aportar al conocimiento académico, sino también ofrecer un marco analítico útil para fortalecer las políticas de seguridad alimentaria, el acceso y la capacidad adquisitiva de los consumidores, el ordenamiento productivo y la distribución equitativa de alimentos en Colombia.

La revisión de la literatura muestra que en Colombia no se han desarrollado estudios que integren de manera simultánea análisis espacial y evaluación multicriterio para explicar las dinámicas propias de la formación de precios agrícolas. En consecuencia, este trabajo representa una contribución original y relevante al análisis económico con enfoque territorial, con potencial para enriquecer la formulación de políticas públicas relacionadas con la formación de precios, el abastecimiento mayorista, la seguridad alimentaria y la distribución equitativa de recursos.

1.2 Pregunta de investigación

1.2.1 Pregunta principal

¿Cómo se configuran las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas de la papa negra en Colombia entre 2019 y 2022, y qué relación guardan con las condiciones agroproductivas departamentales?

1.2.2 Preguntas orientadoras

1. ¿De qué manera la producción, el abastecimiento mayorista y la aptitud del suelo explican la variabilidad espacial y temporal de los precios de la papa negra?
2. ¿Qué patrones regionales y semestrales pueden identificarse en la relación entre el Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA) y la evolución de los precios en los principales mercados del país?

Las preguntas de investigación formuladas cumplen un papel central en este trabajo, pues orientan el análisis hacia la comprensión de las variaciones espaciales y temporales de los precios mayoristas de la papa en Colombia. Al vincular dichos precios con factores agroproductivos y territoriales, permiten estructurar un camino metodológico claro y coherente que articula indicadores compuestos, análisis multivariado y representación espacial. De esta manera, no solo delimitan el objeto de estudio, sino que también aseguran que los resultados contribuyan con evidencia sólida para interpretar las dinámicas territoriales de los precios y ofrecer insumos útiles en materia de planificación productiva y seguridad alimentaria.

1.3 Objeto de la investigación

El objeto de estudio de esta investigación son las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas de la papa negra en Colombia durante el periodo 2019-2022. Dichas dinámicas se analizan desde un enfoque territorial y multicriterio, considerando la interacción entre factores socioeconómicos, agroproductivos y biofísicos que inciden en la formación y variabilidad de precios. En este marco, se busca comprender cómo la producción, el abastecimiento mayorista y la aptitud del suelo —integrados en el Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA)— se relacionan con el comportamiento de los precios en los principales mercados del país agregado a

nivel departamental, con el fin de identificar patrones regionales y temporales que aporten a la interpretación integral del fenómeno.

1.3.1 Objetivo general

Analizar las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas de la papa negra en Colombia entre 2019 y 2022, a partir de un enfoque territorial y multicriterio que relacione las condiciones agroproductivas departamentales con la evolución de los mercados mayoristas.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Construir un Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA) a nivel departamental que integre variables de producción, abastecimiento mayorista y aptitud del suelo para el cultivo de papa.
2. Examinar la variabilidad espacial y temporal de los precios mayoristas de la papa negra en los principales mercados del país, identificando patrones regionales y semestrales.
3. Evaluar la relación entre el ICA y la dinámica de los precios mayoristas mediante técnicas estadísticas, análisis por componentes principales (PCA) y cartografía temática, con el fin de identificar territorios con mayor susceptibilidad a fluctuaciones de precios.

1.4 Hipótesis o argumento central

La hipótesis en la que se basa este estudio sugiere que la variabilidad de los precios mayoristas de la papa en Colombia entre 2019 y 2022 no puede explicarse únicamente por dinámicas de mercado, sino que responde de manera significativa a las condiciones agroproductivas y territoriales de cada departamento: una mayor producción, abastecimiento y aptitud del suelo tienden a relacionarse con precios más bajos debido al efecto de una mayor oferta.

2. Marco Teórico

2.1 Estado del arte

Los precios de los alimentos han sido objeto de múltiples estudios a nivel internacional, en los que se resalta su comportamiento altamente sensible a factores tanto económicos como territoriales. En particular, se ha evidenciado que los precios no se distribuyen de manera homogénea, sino que responden a patrones espaciales y temporales diferenciados, asociados con la localización de la producción, las infraestructuras de transporte, los niveles de intermediación, la estacionalidad climática y la proximidad a los centros de consumo. Este tipo de aproximación permite superar la visión reduccionista de los precios como simples resultados de la interacción entre oferta y demanda, situándolos en un entramado de dinámicas territoriales.

Diversos trabajos han demostrado la utilidad de las técnicas de análisis espacial para comprender estas variaciones. Vicentin y Chara (2020), por ejemplo, analizaron los precios minoristas de alimentos básicos en la ciudad de Santa Fe (Argentina) mediante Análisis Exploratorio Espacial de Datos (AEDE), mostrando la existencia de clústeres espaciales y de diferencias significativas entre sucursales de supermercados según su localización. Sus hallazgos evidencian que los precios de productos cotidianos como la carne, el pan o la leche no solo dependen de las condiciones de mercado, sino también de la configuración territorial de la oferta y la distribución.

En Asia, investigaciones como las de Myae et al. (2005) en Myanmar y Jubaedah (2013) en Indonesia han resaltado cómo los precios agrícolas de productos como tomate, papa o chile rojo presentan variabilidad explicada por factores territoriales como la distancia entre mercados, la calidad de la infraestructura, el tamaño de la población y el nivel de producción local. Estos estudios coinciden en que la dimensión espacial es fundamental para entender las diferencias en los precios y que la heterogeneidad territorial genera dinámicas de precios particulares, que no pueden captarse únicamente desde el análisis de carácter económico.

En Colombia, aunque existen investigaciones centradas en los precios de alimentos, la mayoría se ha orientado al estudio de la estacionalidad y de las variaciones en el tiempo o bien a aproximaciones de tipo econométrico. Trabajos como los de Alonso y Montoya (2006) para el caso de la papa, Neira, Martínez y Orduz (2016) en piña, y Troncoso-Sepúlveda (2019) en arroz, han aportado elementos clave sobre la dinámica de precios en diferentes mercados mayoristas, pero han privilegiado enfoques de integración de mercados y transmisión de precios en el largo plazo. Aunque estos aportes resultan valiosos, aún son escasos los estudios que aborden de manera sistemática la variabilidad espaciotemporal de los precios de alimentos desde un enfoque geográfico apoyado en técnicas de evaluación multicriterio y en el uso de sistemas de información geográfica (SIG).

Este vacío resulta particularmente relevante en el contexto colombiano. La diversidad agroecológica del país, caracterizada por contrastes en clima, suelos, topografía y acceso a mercados, incide directamente en los costos de producción y comercialización, generando diferencias territoriales significativas en los precios (Castillo, 2007). Asimismo, la coexistencia de zonas netamente productoras con grandes centros de consumo, sumada a la influencia de fenómenos climáticos y estacionales, contribuye a la complejidad de los precios mayoristas. En este sentido, explorar cómo estas dinámicas se expresan en el tiempo y en el espacio resulta clave para comprender la lógica de los precios de alimentos, y constituye un insumo estratégico para la formulación de políticas de seguridad alimentaria y ordenamiento productivo.

2.2 Marco teórico

El estudio de la formación de precios agrícolas ha evolucionado hacia la incorporación de enfoques espaciales y multicriterio, en la medida en que los mercados agroalimentarios no responden únicamente a la dinámica clásica de oferta y demanda. Las particularidades territoriales, tales como la heterogeneidad en los suelos, la infraestructura de transporte, la conectividad a mercados y las condiciones climáticas, introducen diferencias significativas que explican la variabilidad de los precios entre regiones. En este sentido, los análisis contemporáneos

reconocen que el precio es un fenómeno económico, pero también espacial y social, en tanto que está influenciado por factores estructurales que se desarrollan y relacionan de manera diferenciada en cada contexto.

En tal sentido, las investigaciones recientes enfatizan la necesidad de integrar modelos de econometría espacial, técnicas de evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica (SIG) para capturar integralmente la complejidad territorial en la determinación de precios agrícolas. Estos enfoques combinados permiten identificar patrones espaciales de productividad y comercialización, a la vez que buscan comprender cómo las interacciones entre factores agroproductivos, logísticos y biofísicos se reflejan en la formación de precios. En tal contexto, el presente trabajo se sustenta en un marco teórico que concibe los precios agrícolas como el resultado de dinámicas multidimensionales y territoriales, cuya explicación implica herramientas analíticas más allá del análisis económico tradicional desde la oferta y la demanda.

2.2.1 Modelos espaciales aplicados a la agricultura y la determinación de precios

El análisis espacial ha cobrado importancia en la economía agrícola, ya que permite capturar la estructura territorial de variables como los precios, la productividad, los factores biofísicos, climáticos y de infraestructura. La incorporación de técnicas espaciales resulta clave en contextos rurales donde los costos de transporte, la localización de los centros de acopio o mercados y la conectividad vial, tienen efectos significativos sobre la fijación de los precios. En esta vía, Arias & Antosová (2018), usan modelos de rezago espacial que les permite identificar cómo el aislamiento y los costos logísticos afectan el acceso a mercados agrícolas más amplios. De tal manera que el uso de técnicas de econometría espacial mejora la precisión de los análisis de productividad y variables climáticas en los mercados agrícolas (LeSage & Pace, 2009).

Dentro de este campo, la econometría espacial ofrece herramientas como los modelos SAR (autorregresivos espaciales), SEM (errores espaciales) y SDM (Durbin espacial), que permiten modelar dependencias entre unidades geográficas y corregir sesgos derivados de la autocorrelación espacial (LeSage & Pace, 2009). Estos enfoques han sido aplicados en diversos contextos para

estudiar fenómenos como la convergencia regional de precios agrícolas, la difusión espacial de tecnologías y los efectos indirectos de la infraestructura sobre el desempeño productivo. En tal sentido, Conley y Udry (2010) emplean técnicas espaciales para analizar la difusión de conocimiento agrícola en Ghana, mostrando cómo la proximidad geográfica influye en la adopción de tecnologías y, en consecuencia, en los resultados económicos de los cultivos.

En los últimos años, se han incorporado al análisis agrícola modelos de aprendizaje automático con datos espaciales, como *Random Forest*, *XGBoost* y redes neuronales. Estas técnicas permiten capturar relaciones no lineales e interacciones complejas entre variables territoriales, aprovechando tanto información georreferenciada como datos provenientes de sensores remotos (Oikonomidis et al., 2022; Javed & Mural, 2024). Si bien ofrecen altos niveles de precisión predictiva, presentan limitaciones para su aplicación en la formulación de políticas públicas, dado que su interpretación es limitada y su implementación suele requerir elevados recursos computacionales debido a la complejidad de los modelos.

En este sentido, la Evaluación Multicriterio (EMC), y en particular el análisis por componentes principales, constituye una alternativa valiosa porque integra información cuantitativa y cualitativa en un marco coherente con la naturaleza del problema. Esta aproximación no solo reduce la complejidad de los datos y evita redundancias, sino que también permite construir indicadores sintéticos que expresan de forma clara las condiciones territoriales. De esta manera, se facilita la identificación de relaciones significativas entre los factores productivos, socioeconómicos y ambientales, ofreciendo una base sólida para interpretar las dinámicas de los precios y orientar la toma de decisiones en política agraria y seguridad alimentaria.

La articulación entre herramientas de análisis espacial y modelos multicriterio amplía las posibilidades para representar territorialmente los determinantes de los precios agrícolas. En países como Colombia, marcados por una profunda heterogeneidad territorial y brechas estructurales en infraestructura, esta aproximación permite identificar zonas con alta vulnerabilidad a fluctuaciones de precios, lo que permite diseñar intervenciones diferenciadas.

2.2.2 Enfoque multicriterio en la estimación de precios agroalimentarios

La Evaluación Multicriterio (EMC) se ha consolidado como una herramienta metodológica rigurosa y flexible para abordar problemas complejos en los que intervienen múltiples dimensiones de análisis, especialmente en contextos territoriales. A diferencia de los enfoques tradicionales de decisión, que suelen centrarse en un único criterio de optimización, la EMC permite integrar aspectos cuantitativos y cualitativos en una estructura jerárquica y coherente de valoración (Belton & Stewart, 2002). Su aplicación en el ámbito del desarrollo permite abordar decisiones relacionadas con la sostenibilidad, la planificación del uso del suelo y la gestión de recursos naturales (Geneletti, 2010).

En el caso del análisis espacial aplicado a la economía en la agricultura, la EMC permite incorporar factores biofísicos, logísticos, económicos y socioculturales que inciden de manera simultánea en la producción, distribución y comercialización de bienes agrícolas. Autores como Feizizadeh y Blaschke (2013) han demostrado la utilidad de integrar EMC con Sistemas de Información Geográfica (SIG) para generar análisis espaciales robustos en contextos rurales y agrícolas.

En este marco, el Análisis por Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés), propuesto inicialmente por Pearson (1901) y desarrollado formalmente por Hotelling (1933), constituye una de las metodologías más reconocidas dentro del enfoque multicriterio. Dicho método permite reducir la dimensionalidad de un conjunto de variables correlacionadas, transformándolas en un número menor de componentes no correlacionados que retienen la mayor parte de la varianza del sistema. La principal ventaja del PCA radica en su capacidad para sintetizar grandes volúmenes de información en factores clave, facilitando la identificación de patrones espaciales y temporales subyacentes. Al respecto, Jolliffe & Cadima (2016) destacan que su integración con técnicas de análisis espacial fortalece la interpretación de dinámicas territoriales complejas y aporta herramientas sólidas para la toma de decisiones en el ámbito agroproductivo y de la seguridad alimentaria.

Ahora bien, los precios agrícolas, especialmente en mercados mayoristas, han sido explicados desde modelos de oferta y demanda. Sin embargo, actualmente existe un mayor consenso en que la determinación de los precios también está influenciada por factores territoriales como el acceso a infraestructura, las condiciones hidrometeorológicas, los hábitos de consumo, la estacionalidad de los cultivos, la aptitud del suelo y la localización de los mercados (Fafchamps & Hill, 2008). Bajo esta perspectiva se reconoce que las condiciones estructurales del territorio pueden generar diferencias significativas en los precios observados, incluso entre regiones relativamente cercanas o similares en sus condiciones.

En Colombia, la persistencia de desigualdades regionales en infraestructura, acceso a mercados y capacidades productivas ha sido ampliamente documentada y vinculada con brechas en la productividad agrícola y la eficiencia de los sistemas agroalimentarios (Giles et al., 2024). En el caso de la papa, cultivos ubicados en zonas con mejores condiciones de conectividad, acceso a insumos y menor vulnerabilidad climática tienden a presentar mayores rendimientos y menores costos logísticos, lo que influye significativamente en la formación de precios mayoristas. Las diferencias altitudinales y agroecológicas también juegan un papel clave en la productividad, determinando los calendarios de cosecha, la incidencia de plagas y la calidad del producto (Pulido, 2006).

La aplicación de modelos multicriterio en este campo permite superar las limitaciones de los enfoques econométricos tradicionales, al incorporar múltiples dimensiones explicativas y su representación espacial. Esto es especialmente relevante para cultivos como la papa negra, cuyo precio está condicionado no solamente por factores productivos, sino también por su localización geográfica, la infraestructura logística, las condiciones biofísicas, los comportamientos climáticos y la cultura de consumo regional.

La presente investigación se fundamenta en una perspectiva teórica que entiende la formación de precios agrícolas como un proceso territorial multidimensional. Bajo este enfoque, los precios no se explican únicamente por la interacción entre oferta y demanda, sino también por la influencia

de factores físicos, económicos, institucionales y sociales que actúan de manera diferenciada en cada territorio, generando variaciones significativas en los precios agrícolas (Acosta et al., 2014).

Desde esta perspectiva, el precio constituye el resultado de la interacción entre dinámicas económicas, sociales y espaciales, lo que exige herramientas analíticas capaces de capturar dicha complejidad. Así pues, se recurre a la Evaluación Multicriterio Territorial (EMC-T) mediante el análisis por componentes principales, complementada con sistemas de información geográfica (SIG) y modelos de econometría espacial (Amikuzuno & von Cramon-Taubadel, 2012). Este enfoque metodológico permite representar de manera integral la presión territorial que incide en los precios de la papa negra en Colombia, identificar áreas con mayor vulnerabilidad a fluctuaciones y orientar intervenciones diferenciadas por parte de actores públicos y privados.

3. Metodología

La metodología de este trabajo se estructura en torno a la integración de información estadística y territorial con el fin de explicar la variabilidad espacial de los precios mayoristas de la papa negra en Colombia. Para desarrollar el enfoque de análisis espacial propuesta, se diseñó un modelo metodológico de Evaluación Multicriterio Territorial (EMC-T) sustentado en el Análisis por Componentes Principales (PCA), mediante el cual se construye un Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA). Este sintetiza la heterogeneidad productiva, de abastecimiento y agroecológica de los departamentos, y con la ayuda de herramientas SIG, constituye el insumo central para analizar empíricamente la relación entre factores territoriales y la dinámica de los precios agrícolas.

A continuación, se explican las fuentes de la información de producción, abastecimiento, precios y aptitud del suelo, que permiten caracterizar de manera integral las condiciones agroproductivas del territorio. Luego, se presenta la Metodología de Evaluación Multicriterio Territorial mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA) para el análisis de precios de la papa negra en Colombia. Finalmente se describen las fases metodológicas desarrolladas y la formalización matemática de estas.

3.1 Fuentes de información

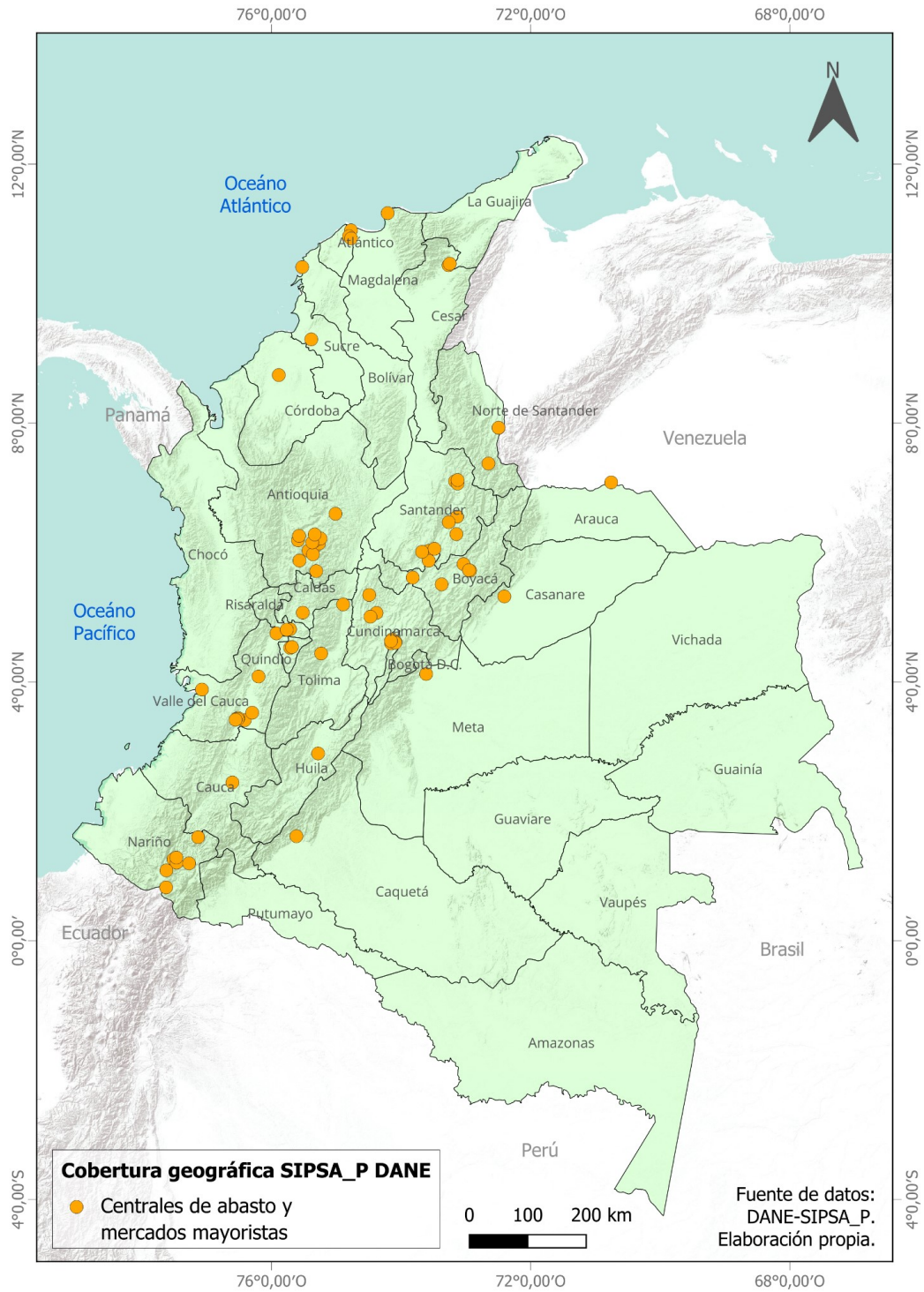
Los datos de los precios mayoristas provienen del Sistema de Información de Precios y Abastecimiento del Sector Agropecuario (SIPSA_P) del DANE (2025). El componente de precios mayoristas del SIPSA tiene como finalidad recopilar, analizar y divulgar información sobre las cotizaciones de alimentos en los principales mercados mayoristas del país. A través del seguimiento continuo de más de 65 plazas, silos y molinos a nivel nacional y regional, el sistema permite observar el comportamiento de los precios y los factores económicos que los determinan a lo largo de la cadena de comercialización. La información se recolecta durante los periodos de mayor actividad comercial e incluye una amplia variedad de productos alimentarios. La base de

precios de la papa negra contiene datos completos para 52 mercados en 24 departamentos del territorio colombiano.

Los puntos resaltados en naranja de la Figura 1, muestran la ubicación geográfica de todos los mercados monitoreados por la operación del SIPSA_P en la cual es posible evidenciar que si bien se cuenta con información relativa a los precios y el abastecimiento mayorista de algunas de las principales ciudades, gran parte del territorio nacional se encuentra por fuera de la medición y se constituye como un aspecto relevante a tener en cuenta dentro las recomendaciones derivadas de este estudio. Más aún, cuando algunos de los departamentos considerados más pobres como Chocó y la Guajira (DANE,2024) así como los que integran la Amazonia y la Orinoquía, que enfrentan desafíos importantes en materia de seguridad alimentaria y necesidades básicas insatisfechas, no cuentan con fuentes de medición.

Por su parte, el componente de Abastecimiento de Alimentos del SIPSA (SIPSA_A), tiene como objetivo generar información diaria sobre el volumen de productos agroalimentarios que ingresan a los principales mercados mayoristas del país (DANE, 2025). Este utiliza una canasta dinámica de productos, cuya composición varía según la oferta efectiva en los mercados. La información recolectada permite analizar la disponibilidad de alimentos, con especial énfasis en frutas, tubérculos, raíces, plátanos, verduras y hortalizas. La cobertura geográfica de SIPSA_A se ha ampliado de manera progresiva, adaptándose a los mercados mayoristas más representativos del país. La información está disponible parcialmente para los 32 mercados que monitorea esta operación.

Figura 1. Centrales y mercados mayoristas monitoreados por SIPSA_P – DANE, 2024



Entre tanto, los datos de las toneladas producidas de papa negra por municipio son tomados de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVAS) generadas por la UPRA. Estas evaluaciones semestrales permiten disponer de información detallada sobre las áreas cultivadas y la producción de los cultivos transitorios, entre los que se encuentra la papa negra, así como sobre áreas de forrajes y sistemas silvopastoriles. Esto resulta fundamental para analizar la dinámica productiva y el desempeño de este cultivo a nivel territorial.

La zonificación de aptitud del suelo para el cultivo de papa negra proviene del Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA) de la UPRA. Esta se basa en un enfoque integral de evaluación de tierras que combina los componentes físicos, ecosistémicos y socioeconómicos. La zonificación se realiza mediante criterios y variables que describen las características del territorio y su capacidad productiva, incluyendo factores que determinan niveles de aptitud, zonas no aptas por razones técnicas o legales y áreas que requieren análisis complementario por condicionantes sociales, legales o ambientales. Este enfoque multidisciplinario permite identificar unidades de tierra y los requisitos específicos del cultivo comercial de papa, considerando aspectos de productividad, sostenibilidad y conservación ambiental, asegurando que la zonificación refleje adecuadamente el potencial del territorio para el desarrollo de este cultivo.

En este punto conviene resaltar la robustez técnica de esta información, pues su multidimensionalidad integra dentro de los criterios físicos en el subcomponente climático la precipitación o lluvia, la temperatura y el brillo solar; en el subcomponente edáfico respecto a la capacidad de laboreo variables como pendiente, textura, y pedregosidad; en las condiciones de enraizamiento y tuberización, las variables de profundidad efectiva, textura, pedregosidad; en cuanto a disponibilidad de humedad incluye el régimen de humedad y textura; disponibilidad de nutrientes (acidez, CIC, saturación de bases, carbono orgánico) y de oxígeno (susceptibilidad a inundaciones, drenaje natural).

Respecto a la toxicidad por sales y/o sodio y aluminio considera la salinidad y/o sodicidad y saturación de aluminio; la susceptibilidad a pérdida de suelos contempla pendiente, erosión actual, susceptibilidad a deslizamientos y finalmente en el criterio de riesgo fitosanitario considera temperatura, precipitación y humedad relativa.

El componente socioecosistémico considera la biodiversidad, los bienes y servicios ecológicos vinculados estrechamente con los sistemas sociales mediante los criterios: cambio de cobertura de la tierra (estructura) incluye la variable cobertura de la tierra; frente a la integridad ecológica (función) tiene en cuenta la conectividad estructural de las coberturas naturales, índice de naturalidad y áreas de concentración de especies sensibles; frente a la huella ecológica y transformación (dinámica) aborda la apropiación de agua y variación del contenido estimado de carbono.

Por último, en el componente socioeconómico, abarca dentro del criterio de indicadores económicos variables como grado de importancia económica municipal, créditos otorgados, incentivo a la capitalización rural (ICR); en el criterio precio de la tierra rural incluye el precio de la tierra rural municipal; en el tamaño de la tierra rural tiene en cuenta el tamaño tipo de los predios rurales; en la infraestructura logística observa la accesibilidad a centros de servicios, accesibilidad a centros de comercialización, presencia de entidades bancarias, existencia de cultivos, distritos de adecuación de tierras.

El criterio de mercado laboral contempla la población en edad de trabajar PET20-64, años promedio de escolaridad y oferta educativa a nivel técnico, tecnológico y profesional en áreas agrícolas y forestales; la seguridad ciudadana considera variables como homicidios, riesgo de amenaza, accidentes e incidentes por minas antipersonas y desplazamiento forzado; el criterio de institucionalidad y asociatividad examina el desempeño fiscal, cercanía al SENA, presencia del ICA, presencia de Corpoica, extensión y asistencia técnica sectorial, organizaciones gremiales o de base del sector y finalmente en el criterio condiciones de vida, incorpora el índice de pobreza multidimensional (IPM).

3.2 Evaluación Multicriterio Territorial y PCA para el análisis de precios agrícolas

El objetivo central de este trabajo es la construcción de un Índice de Condiciones Agroproductivas a partir de un enfoque de Evaluación Multicriterio Territorial (EMC-T) basado en el Análisis de Componentes Principales (PCA) para explicar la variabilidad espacial de los precios mayoristas de la papa negra en Colombia. La metodología integra variables territoriales de producción, abastecimiento y aptitud del suelo, que son combinadas en un Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA) construido de manera objetiva y reproducible a partir de información georreferenciada de 52 mercados mayoristas del país. Este enfoque metodológico permite sintetizar la heterogeneidad territorial y productiva en un indicador único, facilitando su representación en SIG y el análisis de los patrones espaciales asociados a la dinámica de precios agrícolas.

3.2.1 Modelo de análisis espacial basado en componentes principales

El presente trabajo propone un enfoque de análisis espacial orientado a explicar la variabilidad de los precios mayoristas de la papa negra en Colombia. Para ello, se integra información productiva, de abastecimiento y de aptitud del suelo espacializada a nivel departamental. A diferencia de los modelos tradicionales sustentados en la jerarquización subjetiva de criterios como el Análisis Jerárquico de Procesos (AHP) planteado por Saaty (1980), en esta investigación se privilegia un procedimiento empírico y reproducible basado en el Análisis de Componentes Principales (PCA).

A partir de los componentes principales, se sintetiza la información contenida en las variables mencionadas anteriormente, generando un índice que resume la heterogeneidad espacial de estas dimensiones. Dicho índice se relaciona posteriormente con la dinámica de los precios mayoristas, permitiendo evaluar cómo la combinación de factores territoriales influye en la formación de los precios agrícolas. Esta aproximación muestra la utilidad de los métodos multivariados para

integrar información compleja y heterogénea distribuida espacialmente y para derivar conclusiones más robustas sobre la influencia territorial en los mercados agrícolas.

Tal como se describió en la sección de fuentes de información, la base de datos se construyó a partir del Sistema de precios y abastecimiento del DANE, las EVAS y la zonificación de aptitud del suelo para el cultivo comercial de papa de la UPRA. Estas variables fueron depuradas, estandarizadas y posteriormente sometidas a un PCA, del cual se extrajo el primer componente principal (PC1), el cual es responsable de la mayor proporción de la varianza explicada. A partir de las cargas absolutas de PC1 se calcularon ponderaciones normalizadas, que sirvieron de base para la construcción de un índice agroproductivo estandarizado en escala 0 a 1. Este índice sintetiza la capacidad relativa de los territorios en términos de producción, abastecimiento y vocación del suelo, siendo un indicador importante del análisis espacial de los precios mayoristas de la papa negra.

3.2.2 Fases desarrolladas en el modelo metodológico

Este estudio emplea un enfoque territorial y multicriterio para analizar la relación entre las condiciones agroproductivas y la variabilidad espaciotemporal de los precios mayoristas de papa negra en Colombia a nivel departamental entre 2019 y 2022. Para esto, se diseñó un modelo metodológico que utiliza el Análisis de Componentes Principales (PCA) para integrar las variables productivas, de abastecimiento y de aptitud del suelo a nivel territorial en un índice agregado. La estrategia metodológica se estructuró en tres etapas principales que permiten garantizar consistencia de datos y la objetividad en la construcción del índice:

1. **Alistamiento, consolidación, limpieza, preparación y agregación de datos:** en esta etapa se descargaron los datos de cada una de las fuentes de información y se agregaron a nivel departamental tanto los precios como el abastecimiento mayorista. Los precios mensuales de cada uno de los departamentos y para cada año del periodo de análisis fueron deflactados para luego ser agregados por semestre 1 y 2 de cada año. La deflactación de precios constituye un

procedimiento fundamental en los análisis económicos y agroalimentarios, ya que permite eliminar el efecto de la inflación y expresar los valores monetarios en términos reales y comparables a lo largo del tiempo. En este estudio, los precios mayoristas de papa fueron deflactados a precios constantes con base en diciembre de 2018, lo cual garantiza que las variaciones observadas en el periodo 2019–2022 correspondan a cambios reales en las dinámicas de mercado y no a distorsiones derivadas del aumento general de precios en la economía.

Tomar diciembre de 2018 como periodo base resulta estratégico por dos razones principales. En primer lugar, proporciona un punto de referencia previo al inicio de la serie analizada, lo que asegura la homogeneidad de los cálculos. En segundo lugar, corresponde a un momento de relativa estabilidad macroeconómica en Colombia, antes de las fuertes perturbaciones que experimentó el sistema agroalimentario durante la pandemia por COVID-19 y la posterior crisis inflacionaria global.

En cuanto al abastecimiento mayorista, los datos mensuales fueron totalizados semestralmente respecto al número de toneladas de papa que ingresaron a cada departamento. Del mismo modo, se construyó el indicador de aptitud agregado a partir de la capa de aptitud del suelo desarrollada por UPRA en la cual las categorías alta, media y baja fueron ponderadas para crear un indicador único por departamento en el rango de valores 0 -1. Los datos de producción total reportados por las EVAS se tomaron por departamento y no fueron agregados en temporalidad, pues la periodicidad correspondía con el semestre de cada año de análisis.

Una vez integradas las variables, se eliminaron los departamentos sin registros en las tres variables: producción, abastecimiento y aptitud del suelo. Esto con el objetivo de garantizar la consistencia de la muestra. Posteriormente, se realizó la normalización de cada una de las variables para estandarizar las escalas a valores de rango entre 0 y 1. Con ello se asegura la comparabilidad estadística de los datos y se evitan sesgos de escala.

2. **Construcción del Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA):** se aplicó el Análisis por Componentes Principales (PCA) para reducir la dimensionalidad de la información y obtener factores clave que expliquen la variabilidad territorial de los precios. En este sentido, se integraron variables de producción, abastecimiento mayorista y aptitud del suelo para el cultivo de papa a nivel departamental. A partir de esto, se calcularon las ponderaciones empíricas de cada variable y se construyó el Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA) semestral mediante el software R. Este resume la presión territorial y productiva que influye en la variación de precios. El índice se normaliza de cero a uno para facilitar su interpretación.
3. **Representación cartográfica y análisis espacial:** mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como ArcGIS Pro, se representaron los resultados del ICA y su relación con los precios mayoristas en los principales mercados del país, identificando patrones regionales y temporales de estabilidad o volatilidad. También, se desarrollaron indicadores globales de asociación espacial (Moran I) y locales (LISA), con el fin de identificar patrones de dependencia espacial, clústeres territoriales de alto y bajo desempeño, así como zonas críticas con mayor susceptibilidad a fluctuaciones de precios.

Este diseño metodológico permitió vincular de manera sistemática las condiciones agroproductivas departamentales con el comportamiento de los precios, ofreciendo un marco robusto para la interpretación de las dinámicas espaciotemporales en el sistema agroalimentario colombiano. Por tanto, avanza hacia una explicación multivariada y espacialmente explícita de los precios agrícolas. En lugar de interpretarlos únicamente bajo los principios clásicos de oferta y demanda, se reconoce que su variabilidad también depende de factores estructurales ligados a la distribución territorial de la producción, el acceso logístico y las condiciones agroecológicas del cultivo de papa negra. La literatura económica y espacial respalda esta aproximación, Krugman (1991) enfatiza el papel de las economías de localización y la concentración geográfica en los precios, mientras que Anselin (1995) resalta la importancia de los patrones espaciales en fenómenos económicos y sociales.

Finalmente, la articulación metodológica entre el PCA y las herramientas SIG no solo garantiza rigurosidad técnica, sino que también fortalece la capacidad analítica para identificar territorios especialmente sensibles a las dinámicas de precios. Esto proporciona insumos estratégicos para la planificación territorial, la formulación de políticas diferenciadas y el diseño de instrumentos de estabilización que fortalezcan la competitividad del sector del cultivo de la papa negra en Colombia.

3.2.3 Componentes Principales y construcción del Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA)

El Análisis de Componentes Principales (PCA) permite combinar variables correlacionadas en componentes ortogonales que capturan la mayor parte de la variabilidad de los datos (Jolliffe, 2002). En este estudio, el PCA se aplicó sobre tres variables clave:

- x_1 : producción en toneladas de papa negra en el departamento.
- x_2 : abastecimiento en toneladas de papa negra en el departamento.
- x_3 : aptitud del suelo, entendida como la proporción de hectáreas aptas para el cultivo de papa negra sobre el total de hectáreas del departamento.

Antes de aplicar el PCA, cada variable fue normalizada usando z-score, es decir:

$$x_{ij}^z = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}$$

Donde, x_{ij} es el valor de la variable j en el departamento i ; \bar{x}_j es la media de la variable j ; s_j es la desviación estándar. Esta estandarización garantiza que todas las variables tengan media cero y desviación estándar uno, evitando que diferencias de escala distorsionen el análisis (Shlens, 2014).

En este sentido, el primer componente principal PC_1 se calcula como:

$$PC_1 = a_1 x_1^z + a_2 x_2^z + a_3 x_3^z$$

Sujeto a:

$$a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1$$

Donde a_1, a_2, a_3 son las cargas (loadings) que indican la contribución relativa de cada variable al primer componente. Cada componente posterior se calcula de forma ortogonal, pero para este estudio se centra el análisis en PC1, que sintetiza la mayor parte de la variabilidad conjunta. Asimismo, la suma de los cuadrados de las cargas igual a 1 es la condición de normalización del primer componente principal. Esto asegura que el componente sea interpretable como una combinación ponderada de las variables estandarizadas (Shlens, 2014).

Para transformar PC_1 en un índice interpretable, se toman las cargas absolutas del primer componente, $|a_1|, |a_2|, |a_3|$, normalizadas para que sumen 1, para obtener las ponderaciones relativas de cada variable de la siguiente manera:

$$w_j = \frac{|a_j|}{\sum_{k=1}^3 |a_k|}, \quad j = 1, 2, 3$$

A partir de lo anterior, el Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA) se calcula como:

$$ICA_i = \sum_{j=1}^3 w_j x_{ij}^z$$

el cual para facilitar la interpretación y comparación entre departamentos se normaliza entre 0 y 1 de la siguiente manera:

$$ICA_i^{normalizado} = \frac{ICA_i - \min(ICA)}{\max(ICA) - \min(ICA)}$$

Las ponderaciones w_1, w_2, w_3 reflejan la importancia relativa de la producción, el abastecimiento y la aptitud del suelo en la variación conjunta de los datos. El índice resultante sintetiza la heterogeneidad territorial y productiva de los departamentos, permitiendo relacionarlo con la variación de los precios mayoristas de papa negra. La literatura respalda el uso de PCA para construir índices objetivos y reproducibles en contextos agrícolas y económicos (Abdi &

Williams, 2010). Asimismo, la integración con herramientas de SIG posibilita la visualización de patrones espaciales y clústeres de alto y bajo desempeño, lo cual apoya la planificación territorial y la formulación de políticas diferenciadas (Anselin, 1995).

4. Resultados

En esta sección se presentan los principales hallazgos obtenidos a partir del análisis espacial y temporal de las dinámicas agroproductivas y de mercado de la papa en Colombia. En particular, se muestran los patrones derivados del Índice de Capacidades Agroproductivas (ICA) y de los precios mayoristas de papa negra durante el periodo 2019-2022, con el fin de identificar contrastes territoriales y tendencias coyunturales que inciden en la seguridad alimentaria. Los resultados se organizan en torno a la caracterización espacial de cada indicador, la comparación entre ambos y la interpretación de las diferencias regionales, lo que permite comprender cómo las condiciones estructurales de producción interactúan con la volatilidad del mercado y generan desigualdades territoriales en el acceso y la disponibilidad del alimento.

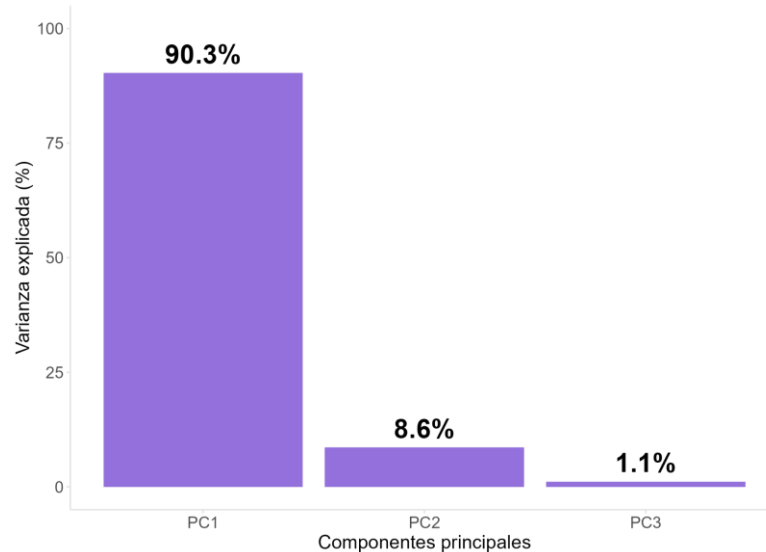
4.1 Análisis de componentes principales (PCA)

Como se mencionó en la metodología, con el propósito de sintetizar la información proveniente de las tres dimensiones fundamentales para la dinámica agroproductiva de la papa negra en Colombia (producción, abastecimiento e índice de aptitud del suelo), se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) sobre las variables previamente estandarizadas. El objetivo fue identificar un patrón común de variación para construir un índice sintético que refleje la capacidad agroproductiva territorial y su incidencia potencial sobre la formación de los precios mayoristas.

Los resultados muestran que el primer componente principal (PC1) explica el 90,3% de la varianza total, mientras que el segundo y tercer componente explican únicamente el 8,6% y el 1,1%, respectivamente. Los autovalores asociados fueron de 2,709 para PC1, 0,258 para PC2 y 0,033 para PC3, confirmando que solo el primer componente supera la unidad. De acuerdo con el criterio de Kaiser (1960), únicamente los componentes con autovalores superiores a 1 deben ser retenidos, lo cual respalda la elección de PC1 como la dimensión central. Este resultado se confirma también mediante la inspección de la Figura 2, donde se observa una caída pronunciada de la varianza explicada tras el primer componente, y mediante el análisis paralelo de Horn (1965). En este análisis, los autovalores observados se comparan con los que surgirían de datos generados aleatoriamente, sin ninguna estructura real. Por tanto, PC2 y PC3 presentan valores tan bajos que difícilmente superarían estos autovalores aleatorios, indicando que aportan muy poca

información adicional. En conjunto, la evidencia confirma que la estructura de los datos es fuertemente unidimensional, dominada por una dimensión subyacente que resume la covariación de las tres variables analizadas (Jolliffe & Cadima, 2016).

Figura 2. Porcentaje de varianza explicada por cada componente



Fuente: elaboración propia.

El comportamiento unidimensional del índice se traduce en que la mayor parte de la información contenida en producción, abastecimiento y aptitud del suelo puede representarse de manera robusta en un único indicador compuesto. Este hallazgo es consistente con la literatura que enfatiza la utilidad del PCA en la reducción de dimensionalidad y en la construcción de índices sintéticos en economía agrícola y análisis territorial (Peres-Neto et al., 2005). Asimismo, el elevado cociente entre el primer y el segundo autovalor ($\lambda_1/\lambda_2 \approx 10,5$) refuerza la presencia de un factor general dominante, lo cual justifica la construcción de un índice único (Jolliffe, 2002).

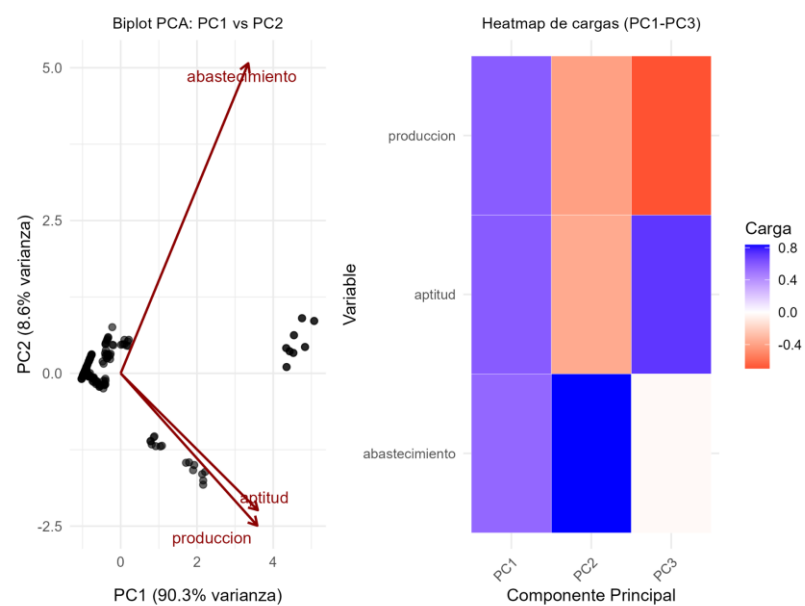
En términos de ponderaciones, las cargas del primer componente principal, normalizadas en valor absoluto y expresadas como pesos relativos, fueron 0,340 para producción, 0,318 para abastecimiento y 0,342 para aptitud del suelo. Estas cargas representan la contribución de cada variable al componente y, en este caso, se utilizan como ponderaciones para calcular el Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA),

asegurando que cada variable aporte proporcionalmente a la medida final. El resultado sugiere que las tres dimensiones contribuyen de manera casi equilibrada a la conformación del índice, con una pequeña mayor influencia de la producción y la aptitud del suelo.

En este sentido, el biplot de cargas (Figura 3, izquierda) muestra cómo las variables producción, abastecimiento y aptitud se proyectan de manera positiva sobre el primer componente principal (PC1), que explica más del 90 % de la varianza total. Esto indica que el PC1 sintetiza adecuadamente la información conjunta de las tres dimensiones, capturando un patrón común de variación. El ángulo reducido entre las flechas de producción y aptitud sugiere que estas variables están altamente correlacionadas, mientras que el abastecimiento, aunque también positivo en PC1, aporta un eje adicional de diferenciación a través del PC2 (8.6 % de la varianza).

Por su parte, el heatmap de cargas (Figura 3, derecha) confirma el patrón descrito al mostrar intensidades similares de contribución en PC1 para las tres variables, aunque con matices en los componentes secundarios. Concretamente, abastecimiento se asocia fuertemente con PC2, mientras que producción y aptitud presentan cargas más relevantes en PC3. Este contraste complementa la visión del biplot y permite identificar la estructura latente de las relaciones entre las variables.

Figura 3. Biplot y heatmap de las cargas de los componentes principales



Fuente: elaboración propia.

En síntesis, el PCA evidencia que la dinámica agroproductiva de la papa negra puede representarse en una única dimensión (componente) que explica más del 90% de la información original. El ICA es derivado de una combinación ponderada y objetiva de producción, abastecimiento y aptitud del suelo, lo cual lo convierte en una herramienta sólida para analizar la distribución territorial y las correlaciones espaciales de la agroproducción. De esta manera, se aporta a la comprensión de los determinantes estructurales de la formación de precios mayoristas de este producto en Colombia.

4.2 Distribución espacial del Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA)

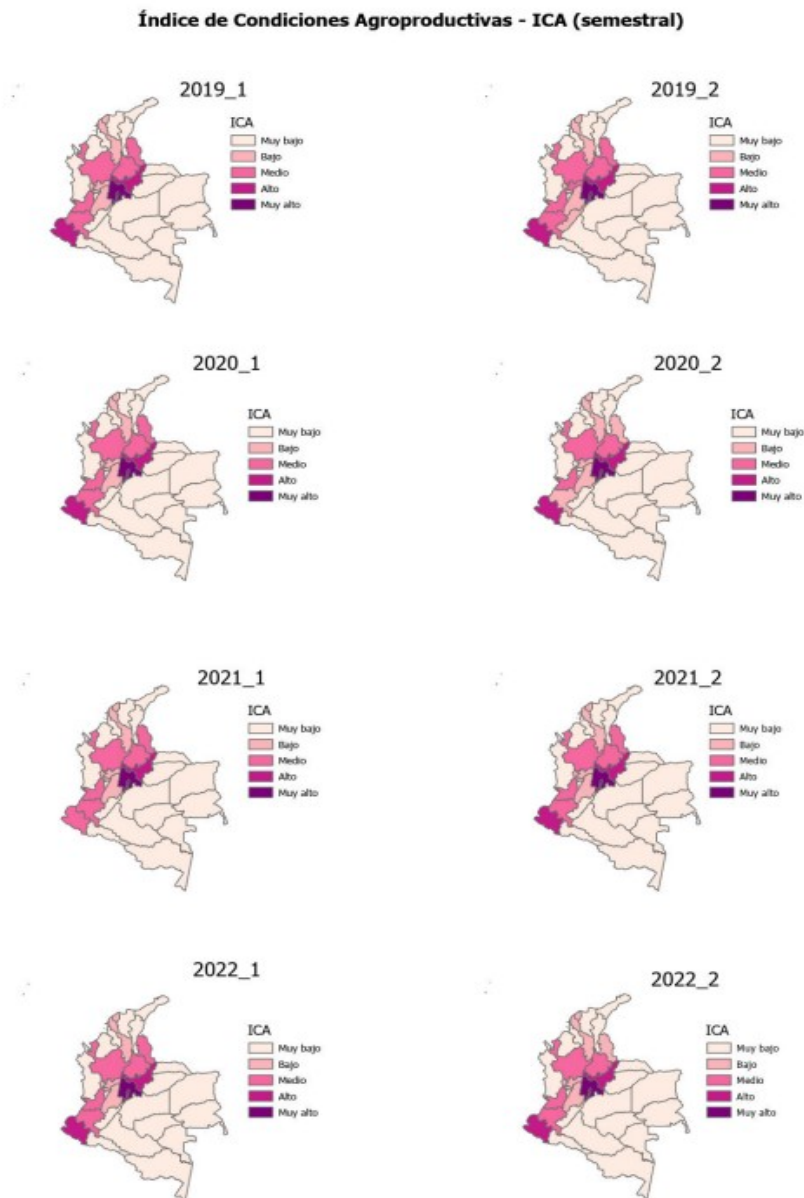
Los resultados espaciales y temporales del ICA y de los precios mayoristas de papa negra por kilogramo, permiten observar patrones contrastantes entre la estabilidad estructural de las condiciones agroproductivas y la variabilidad coyuntural de los precios. Mientras el ICA evidencia desigualdades persistentes entre regiones —con una franja andina central que concentra los valores más altos y zonas periféricas en categorías bajas—, los precios presentan una dinámica más volátil, marcada por fluctuaciones semestrales y diferencias territoriales posiblemente asociadas a factores de producción, transporte y acceso a mercados. La comparación entre ambos indicadores aporta elementos clave para comprender cómo la capacidad agroproductiva incide en la formación de precios y, en consecuencia, en la seguridad alimentaria regional.

La Figura 4 sugiere que en el periodo 2019 – 2020, algunos departamentos tuvieron valores muy altos de ICA de forma relativamente estable en zonas del centro y occidente (ej. Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia) en consonancia con cifras oficiales que indican que en el país se cultiva papa en once departamentos, pero sólo cuatro de ellos, Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia, en su orden, concentran alrededor del 90% del área y la producción nacional. Mientras que los departamentos del oriente y sur permanecen en niveles muy bajos o bajos, lo que refleja limitaciones estructurales de capacidad agroproductiva.

Para 2021 – 2022, se mantienen los patrones territoriales: regiones andinas con mayor capacidad agroproductiva, mientras que zonas periféricas (Orinoquía, Amazonia, Caribe seco) permanecen en

categorías bajas, no se observan saltos bruscos; el ICA parece tener un comportamiento estructural más estable, asociado a factores como infraestructura, tradición agrícola, suelos y acceso a mercados. De esta manera, el índice evidencia desigualdades persistentes entre regiones: la franja andina central mantiene una alta capacidad, mientras que la periferia rural marginal muestra rezagos estructurales.

Figura 4. Mapas semestrales del Índice de Condiciones Agroproductivas - ICA (2019-2022)

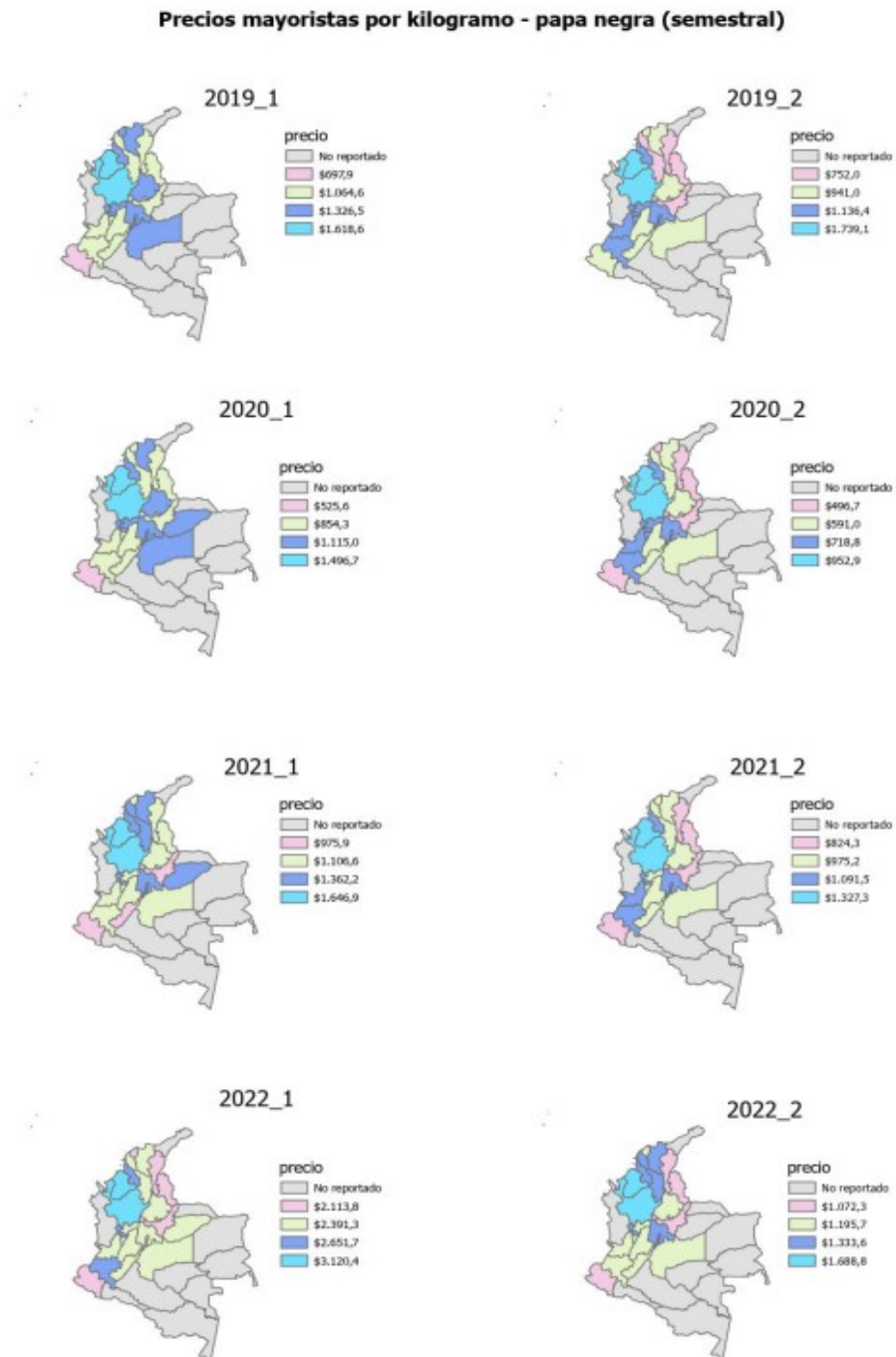


Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, los resultados espaciales de los precios mayoristas de papa negra evidencian una dinámica compleja en la que departamentos tradicionalmente productores, como Cundinamarca y Antioquia, concentran de manera reiterada los valores más altos durante el periodo analizado. Esta tendencia, contraria a la expectativa de que la producción local se traduzca en menores precios, puede estar asociada a los elevados costos de insumos y mano de obra, a la concentración de la demanda en los principales nodos de abastecimiento y al papel de la intermediación en la formación de precios mayoristas. De hecho al observar las cifras de abastecimiento reportadas por el SIPSA_A abordadas en este estudio, es evidente la participación de Cundinamarca como el departamento con mayor volumen de ingreso de este producto a las centrales de abasto de la región y más específicamente en Bogotá donde aproximadamente ingresa el 30% del abastecimiento nacional, seguido precisamente por Antioquia cuya participación representa cerca del 10%.

En contraste, otras zonas productoras como Boyacá, Santander, Norte de Santander y Nariño, así como algunos departamentos periféricos que dependen del abastecimiento externo muestran valores intermedios o incluso bajos en determinados semestres, lo que sugiere que la estructura logística y comercial incide de manera significativa en las diferencias territoriales. Desde una perspectiva temporal, se observa una marcada volatilidad: entre 2019 y 2020 los precios presentan incrementos progresivos en los departamentos productores, alcanzan picos generalizados en 2021 —posiblemente vinculados a choques en la oferta y al aumento de costos logísticos y climáticos derivados de la pandemia—, que tienden a estabilizarse o descender en 2022, aunque persisten las brechas regionales. En conjunto, estos resultados muestran que la localización productiva no garantiza precios más bajos, y que la formación de precios de la papa negra en Colombia responde tanto a factores coyunturales como a dinámicas estructurales del mercado.

Figura 5. Mapas semestrales de precios mayoristas de papa negra 2019-2022



Fuente: elaboración propia.

La comparación entre el Índice de Capacidades Agroproductivas (ICA) y los precios mayoristas de papa negra permite evidenciar tensiones entre la disponibilidad estructural de recursos productivos y la dinámica del mercado. Mientras el ICA se mantiene relativamente estable en el tiempo, mostrando mayores capacidades en la franja andina central y rezagos persistentes en regiones periféricas, los precios presentan una volatilidad marcada y tienden a concentrarse en valores más altos precisamente en los departamentos con mayores capacidades agroproductivas, como Cundinamarca y Antioquia. Esta aparente paradoja sugiere que la mayor capacidad productiva no necesariamente se traduce en precios bajos para los consumidores locales, debido a la incidencia de factores como los costos de producción, la concentración de la demanda en nodos estratégicos de comercialización y el rol de la intermediación en la fijación de precios. De este modo, mientras el ICA refleja desigualdades estructurales relativamente estables, los precios ponen en evidencia vulnerabilidades coyunturales que amplifican las brechas territoriales, con implicaciones directas para la seguridad alimentaria y la planificación agroecológica en Colombia.

4.3 Autocorrelación espacial global y local

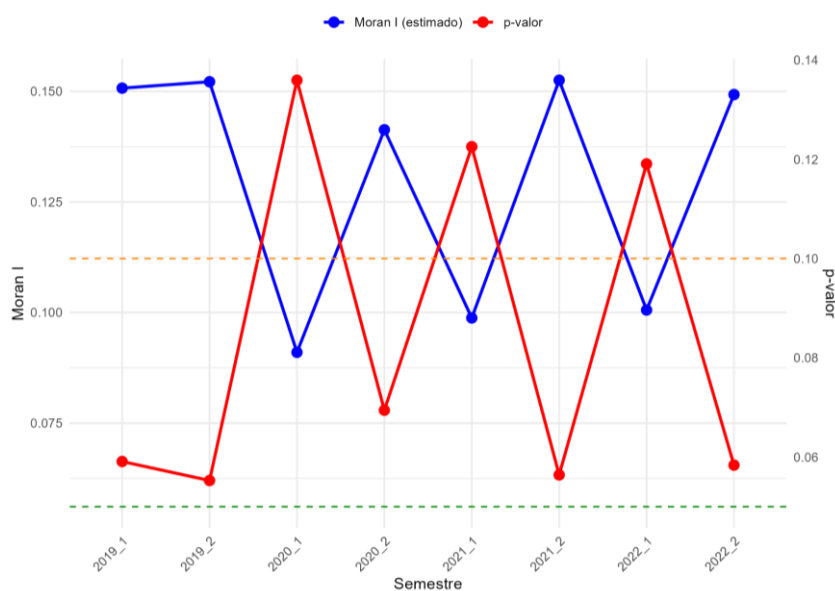
El Índice de Moran I constituye una medida de autocorrelación espacial global ampliamente utilizada en estudios territoriales. Su objetivo es determinar si los valores de una variable presentan un patrón de concentración espacial o si, por el contrario, se distribuyen de manera aleatoria. En términos generales, valores positivos indican agrupamiento espacial con condiciones similares, valores negativos sugieren patrones de dispersión y valores cercanos a cero son compatibles con una distribución aleatoria (Anselin, 1995).

Aunque los valores del índice de Moran I obtenidos para el ICA son positivos en todos los semestres analizados (entre 0,09 y 0,15), su magnitud es moderada y su significancia estadística resulta marginal, con p-valores que oscilan entre 0,055 y 0,136 (Figura 6). Esto quiere decir que existe una tendencia consistente hacia la autocorrelación espacial positiva, es decir, los mercados cercanos tienden a presentar precios similares, pero dicha dependencia no es lo suficientemente fuerte como para configurar bloques territoriales amplios y plenamente integrados. Por tanto, lo que se observa es la presencia de clústeres espaciales de tamaño limitado, intercalados con zonas de transición donde la dependencia espacial pierde

fuerza. En particular, durante los semestres 2019-2, 2021-2 y 2022-2 la evidencia de dependencia espacial resulta más robusta (p-valores entre 0,055 y 0,058), mientras que en otros periodos la autocorrelación no alcanza significancia del 5 %, lo que sugiere que la intensidad de esta dinámica fluctúa en función de condiciones coyunturales de mercado.

Desde la perspectiva de la economía agrícola, este patrón intermedio de autocorrelación es consistente con la heterogeneidad espacial propia de los sistemas productivos andinos, donde factores como la variación altitudinal, la fragmentación de los suelos, el acceso logístico y de vías de transporte, generan fuertes barreras territoriales que impiden la formación de regiones agroproductivas plenamente integradas (Berdegué et al., 2015). Así pues, un índice de Moran I moderado refleja un equilibrio entre la tendencia al agrupamiento, propia de los territorios con condiciones agroecológicas similares, y la disrupción de la continuidad espacial causada por barreras biofísicas y socioeconómicas. Desde la economía espacial, esta dinámica ayuda a explicar por qué la convergencia de los precios mayoristas de la papa negra es solo parcial. Específicamente, existen áreas donde las condiciones agroproductivas conllevan a la integración y transmisión de señales de oferta y demanda, mientras que en otras las condiciones territoriales de los departamentos actúan como barreras que limitan dicha transmisión (Barrett, 2001).

Figura 6. Evolución temporal del índice de Moran I del ICA y su significancia estadística, 2019-2022



Fuente: Elaboración propia.

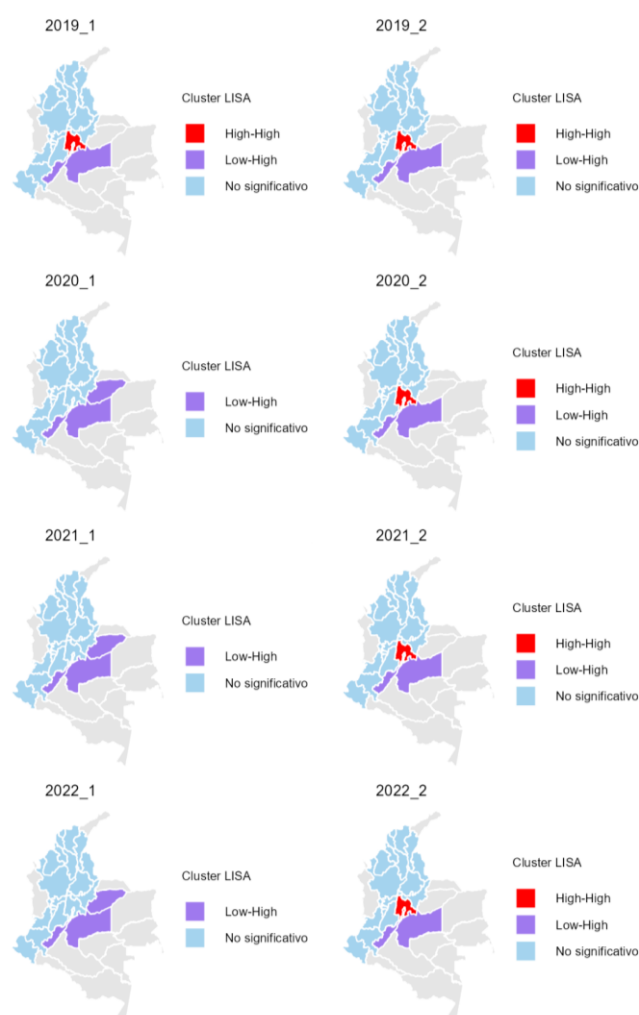
Nota: La línea punteada de color naranja señala el nivel de significancia del 10%, mientras que la de color verde señala el 5%.

Ahora bien, el análisis de autocorrelación espacial mediante Indicadores Locales de Asociación Espacial (LISA) permite desagregar la tendencia global capturada por el índice de Morán y examinar los focos territoriales donde se manifiestan patrones diferenciados (Anselin, 1995). Las medidas globales no permiten identificar las especificidades del fenómeno analizado, es decir, no evidencian la presencia de conglomerados zonales o locales en el marco geográfico, para lo cual son útiles los índices locales en el análisis espacial (Siabato & Guzmán-Manrique, 2019).

Los resultados muestran una alternancia entre clústeres High-High y Low-High en torno al Índice de Condiciones Agropecuarias (ICA), con una notable persistencia temporal en regiones específicas (Figura 7). En particular, se identifica a Cundinamarca y Bogotá con un comportamiento High-High, lo que evidencia que son territorios con alta aptitud agroproductiva para el cultivo de papa negra (alto valores del ICA), al igual que lo que ocurre con sus vecinos. Paralelamente, se observan clústeres Low-High en áreas limítrofes, es decir, departamentos con ICA bajo rodeados de vecinos con ICA alto. Específicamente, los departamentos de Huila, Meta y Casanare tienen dicho comportamiento. Esto revela la existencia de fronteras espaciales estables asociadas a condiciones agroecológicas, características biofísicas y condiciones logísticas que restringen la homogeneidad regional.

Dichos clústeres reflejan la coexistencia de territorios con alta productividad y aptitud del suelo para el cultivo de papa negra junto a áreas de menor capacidad agroproductiva, lo cual introduce asimetrías en la transmisión espacial de los precios. Esta dinámica coincide con lo planteado en la literatura de economía agrícola, que reconoce cómo los costos de transporte, las condiciones logísticas y las diferencias agroecológicas configuran mercados segmentados y conducen a procesos de integración parcial (Fackler & Goodwin, 2001). Además, la estabilidad del patrón Low-High respalda la interpretación del ICA como un determinante estructural de la espacialidad de precios, puesto que el índice captura no solo la capacidad productiva intrínseca, sino también su interacción con el entorno regional.

Figura 7. Evolución de los Cluster LISA del ICA, 2019-2022



Fuente: elaboración propia.

Notas: Se utilizó un nivel de significancia $\alpha = 0,1$. La vecindad se definió según el criterio Queen, considerando como vecinos aquellos departamentos que comparten al menos un vértice. Los pesos espaciales están normalizados por fila (suma de pesos de vecinos = 1). Los clústeres se calcularon usando el estadístico de Moran Local (Anselin, 1995). Los colores representan los tipos de cluster: Rojo = High-High, Naranja = High-Low, Morado = Low-High, Verde = Low-Low, y Azul = No significativo. Los departamentos en color gris no cuentan con datos suficientes para calcular el ICA.

En el caso específico de la papa negra, los resultados del LISA muestran que los precios mayoristas no responden de manera uniforme a las condiciones agroproductivas, sino que se estructuran en torno a clústeres locales que reflejan tanto procesos de integración como de segmentación espacial. La identificación recurrente de clústeres High-High en zonas con alta aptitud productiva confirma la

existencia de territorios donde las señales de mercado tienden a consolidarse, mientras que la persistencia de clústeres Low–High en áreas periféricas evidencia la presencia de particularidades territoriales que limitan la convergencia de precios. En conjunto, estos hallazgos permiten concluir que la dinámica de precios mayoristas de la papa negra en Colombia está condicionada por un equilibrio inestable entre integración y fragmentación espacial, en el que la estructura biofísica, logística y socioeconómica de los territorios desempeña un papel tan decisivo como los factores netamente de mercado.

5. Conclusiones y recomendaciones

El análisis de las dinámicas espaciotemporales de los precios mayoristas de la papa negra en Colombia permitió constatar que la formación de precios en este producto agrícola obedece a una combinación de factores biofísicos, agroproductivos y socioeconómicos, cuya interacción genera patrones diferenciados de variabilidad espacial y temporal. En términos generales, los resultados evidencian que la papa negra no responde únicamente a las fuerzas tradicionales de oferta y demanda, sino que se encuentra influenciada de manera decisiva por las condiciones agroclimáticas de los territorios de producción, la integración espacial de los mercados mayoristas, la infraestructura vial y la capacidad de conectividad entre regiones productoras y centros de consumo. En este sentido, se reafirma la necesidad de comprender los precios agrícolas desde una perspectiva territorial y multicriterio, lo cual contribuye a una interpretación más integral de la economía agroalimentaria colombiana.

En relación con los objetivos planteados, en primer lugar, se construyó el Índice de Condiciones Agroproductivas (ICA) a nivel departamental, integrando variables de producción, abastecimiento mayorista y aptitud del suelo. Los resultados espaciales y temporales del ICA permiten observar patrones estables que reflejan desigualdades estructurales persistentes. Las zonas central y occidental (Cundinamarca, Boyacá, Nariño y Antioquia) concentran las mayores capacidades agroproductivas, mientras que regiones periféricas como la Orinoquía, Amazonía y Caribe seco permanecen en categorías bajas. Esta distribución coincide con estadísticas oficiales que muestran que, si bien el cultivo de papa está presente en once departamentos, cuatro de ellos concentran alrededor del 90 % de la producción nacional. De manera consistente entre 2019 y 2022, el ICA evidencia que las regiones con tradición agrícola, infraestructura y suelos favorables sostienen una alta capacidad, mientras que los territorios periféricos mantienen rezagos estructurales, lo que refleja un patrón territorial de largo plazo.

Por otra parte, los precios mayoristas de papa negra mostraron una dinámica volátil y coyuntural, marcada por fluctuaciones semestrales y choques posiblemente asociados al clima, la producción, el transporte, situaciones extraordinarias como la pandemia de COVID-19 y la crisis inflacionaria global. Los resultados espaciales derivados de la comparación entre los dos indicadores revelan una paradoja interesante: los departamentos con mayor capacidad agroproductiva no se asocian necesariamente con precios más bajos. Por el contrario, en varias ocasiones concentran los valores más altos, lo que sugiere que la formación de

precios no depende únicamente de la disponibilidad local del producto, sino también de los costos de producción, de la concentración de la demanda en nodos estratégicos y del papel de la intermediación en los mercados mayoristas. Así, mientras el ICA refleja condiciones estructurales relativamente invariables, los precios se convierten en un espejo de las vulnerabilidades coyunturales que amplifican las brechas territoriales y generan riesgos diferenciados para productores y consumidores.

En tal sentido, departamentos tradicionalmente productores, como Cundinamarca y Antioquia, concentraron reiteradamente los valores más altos de precios, debido a los elevados costos de insumos y mano de obra, la alta demanda en nodos de abastecimiento y la intermediación. En contraste, otras zonas productoras como Boyacá, Nariño, Santander y Norte de Santander, así como departamentos periféricos dependientes del abastecimiento externo, registraron valores intermedios o bajos en determinados semestres. Temporalmente, los precios aumentaron entre 2019 y 2020, alcanzaron un pico en 2021 y tendieron a estabilizarse en 2022, aunque persistieron las brechas regionales.

En lo relacionado con el aporte académico y metodológico, la investigación aporta varias innovaciones relevantes. Primero, resalta la importancia de los enfoques de economía espacial en el estudio de mercados agrícolas, subrayando que las relaciones de proximidad territorial y conectividad influyen de manera directa en la transmisión y formación de precios. Segundo, la integración del PCA con modelos de Evaluación Multicriterio en un marco de análisis territorial, constituye una contribución metodológica novedosa que permite avanzar hacia la construcción de modelos explicativos más robustos del comportamiento de los precios agrícolas. Esta aproximación evidencia que la determinación de los precios de la papa negra no es un fenómeno aislado ni homogéneo, sino el resultado de interacciones complejas entre factores biofísicos (clima, suelos, aptitud), productivos (rendimientos, ciclos de cosecha), logísticos (infraestructura vial, costos de transporte) y socioeconómicos (estructura de los mercados mayoristas, intermediación y poder de negociación de los agentes). En este sentido, la propuesta metodológica resulta transferible a otros productos agrícolas, constituyéndose en un aporte significativo para futuras investigaciones en el campo de la economía agraria y el análisis espacial con enfoque económico.

Por otro lado, en términos de política pública y gestión territorial, los hallazgos plantean los siguientes elementos clave. Primero, es importante fortalecer la integración de los mercados mayoristas mediante inversiones en infraestructura logística y de transporte con el propósito de reducir las brechas regionales

en los precios y el abastecimiento. Segundo, la planificación productiva debe considerar la heterogeneidad espacial de los territorios para optimizar la localización de la producción de papa negra y mejorar la competitividad de los agricultores en regiones menos favorecidas. Tercero, es clave diseñar e implementar sistemas de información de precios más detallados y con componente espacial, que permitan a productores, comerciantes y formuladores de política tomar decisiones más eficientes y transparentes. Cuarto, la papa negra es uno de los principales productos de la canasta familiar, por lo que la evidencia de variabilidad espacial y temporal en sus precios plantea un reto para la seguridad alimentaria del país, en tanto que las diferencias de precios afectan tanto la accesibilidad económica de los consumidores como la sostenibilidad de los pequeños productores.

Finalmente, el análisis desarrollado demuestra que el entendimiento de los precios mayoristas de la papa negra en Colombia exige un abordaje integral que articule dimensiones territoriales, metodológicas y de política pública. El enfoque adoptado no sólo dio respuesta a la pregunta de investigación, sino también permitió generar una base empírica y conceptual que amplía las posibilidades de análisis en la economía agrícola colombiana. En este sentido, la investigación aporta a la consolidación de un marco analítico innovador para el estudio de la variabilidad de precios de alimentos agrícolas, contribuyendo tanto al ámbito académico como a la formulación de políticas públicas orientadas a la equidad territorial, la productividad agraria, la eficiencia de los mercados y la seguridad alimentaria.

Futuras investigaciones podrían considerar la inclusión de los demás factores mencionados en este estudio disponiendo y adecuando los datos provenientes de diferentes fuentes de información afines al propósito de darle un mayor alcance a este análisis.

Bibliografía

- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Acosta, Alejandro; Ihle, Rico; and Robles, Miguel. 2014. Spatial price transmission of soaring milk prices from global to domestic markets. *Agribusiness* 30(1): 64-73. <https://doi.org/10.1002/agr.21358>
- Alonso, J., & Bonilla López, M. F. (2018). Integración espacial en el mercado de la guayaba pera en el Valle del Cauca. *Cuadernos de Economía*, 37(74), 471-494
- Alonso, J., & Montoya, V. (2006). Integración espacial del mercado de la papa en el Valle del Cauca: dos aproximaciones diferentes, una misma conclusión. Technical report, Borradores de economía y finanzas: Universidad Icesi.
- Amikuzuno, J., & von Cramon-Taubadel, S. (2012). Seasonal variation in price transmission between tomato markets in Ghana. *Journal of African Economies*, 21(4), 669–686. <https://doi.org/10.1093/jae/ejs008>
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Arias Gómez, H. Y., & Antosová, G. (2018). Spatial Patterns of Agriculture in Boyacá. *Apuntes del Cenes*, 37(66), 203-237. <https://doi.org/10.19053/01203053.v37.n66.2019.6013>
- Barrett, C. B. (2001). Measuring integration and efficiency in international agricultural markets. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 23(1), 19–32. <https://doi.org/10.1111/1058-7195.00043>
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- Berdegúe, J. A., Bebbington, A., & Escobal, J. (2015). Conceptualizing spatial diversity in Latin American rural development: Structures, institutions, and coalitions. *World Development*, 73, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.10.015>
- Castillo, O. (2007). Comportamiento temporal de los precios del ganado macho de levante de primera en Sincelejo. *Temas Agrarios*, 12(1), 22–36. <https://doi.org/10.21897/rta.v12i1.648>
- Conley, T. G., & Udry, C. R. (2010). Learning about a new technology: Pineapple in Ghana. *The American Economic Review*, 100(1), 35–69. <https://doi.org/10.1257/aer.100.1.35>
- DANE. (2025). Metodología general sistema de información de precios y abastecimiento del sector agropecuario - SIPSA_P. Reporte metodológico, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/fichas/DSO-SIPSA_P-MET-001.pdf

DANE. (2025b). Índice de precios al consumidor (Boletín técnico). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc>

DANE. (2024). Pobreza monetaria por departamentos en Colombia (Boletín técnico). Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <https://www.dane.gov.co/files/operaciones/PM/bol-PM-Departamental-2023.pdf>

Fafchamps, M., & Hill, R. V. (2008). Price transmission and trader entry in domestic commodity markets. *Economic Development and Cultural Change*, 56(4), 729–766. <https://doi.org/10.1086/588155>

Fackler, P. L., & Goodwin, B. K. (2001). Spatial price analysis. En B. L. Gardner & G. C. Rausser (Eds.), *Handbook of Agricultural Economics* (Vol. 1B, pp. 971–1024). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-0072\(01\)10025-3](https://doi.org/10.1016/S1574-0072(01)10025-3)

Feizizadeh, B., & Blaschke, T. (2012). Land suitability analysis for Tabriz County, Iran: a multi-criteria evaluation approach using GIS. *Journal of Environmental Planning and Management*, 56(1), 1–23. <https://doi.org/10.1080/09640568.2011.646964>

Geneletti D. (2010). Combining stakeholder analysis and spatial multicriteria evaluation to select and rank inert landfill sites. *Waste management* (New York, N.Y.), 30(2), 328–337. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.039>

Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>

Giles Álvarez, L., Larrahondo, C., Hernández, M., Muñoz-Mora, J. C., Angulo, G. D., & Quintero, L. M. (2024). Desigualdades territoriales en Colombia: realidades y perspectivas. <https://doi.org/10.18235/0013019>

Horn, J.L (1965). A rationale and test for the number of factors in factor analysis. *Psychometrika* 30, 179–185. <https://doi.org/10.1007/BF02289447>

Hotelling, H. (1933). Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 24(6), 417–441. <https://doi.org/10.1037/h0071325>

Ihle, R., Rubin, O., Bar-Nahum, Z. y Roel, J. (2020). Imperfect food markets in times of crisis: Economic consequences of supply chain disruptions and fragmentation for local market power and urban vulnerability. *Food Security*, 12(4), 727–734. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01084-1>

Iregui, A.M. and Otero, J. (2013), A Spatiotemporal Analysis of Agricultural Prices: An Application to Colombian Data. *Agribusiness*, 29: 497-508. <https://doi.org/10.1002/agr.21319>

Jabed, M. A., & Murad, M. A. A. (2024). Crop yield prediction in agriculture: A comprehensive review of machine learning and deep learning approaches, with insights for future research and sustainability. *Heliyon*, 10(24), e40836. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40836>

- Jubaedah, N. (2013). Market integration of Red Chilli commodity markets in Indonesia.
- Jolliffe, I. T. (2002). Principal component analysis (2.^a ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/b98835>
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Kaiser, H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>
- Krugman, P. (1991). Geography and Trade. MIT Press.
- LeSage, J., & Pace, R.K. (2009). Introduction to Spatial Econometrics (1st ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781420064254>
- Myae, A., Yutaka, T., Fukuda, S., & Kai, S. (2005). The spatial integration of vegetable markets in Myanmar. *Journal-Faculty of Agriculture Kyushu University*, 50(2): 665-683.
- Neira García, A. M., Martínez Reina, A. M., & Orduz Rodríguez, J. O. (2016). Análisis del mercado de piña Gold y Perolera en dos principales centrales mayoristas de Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(2), 149–165. https://doi.org/10.21930/rcta.vol17_num2_art:486
- Niño, G., Chaparro, J., Niño, A. (2023). Análisis de las tendencias especulativas de los precios de alimentos en Colombia. *Panorama Económico*, 31(4), 294–310. <https://doi.org/10.32997/pe-2023-4771>
- Oikonomidis, A., Catal, C., & Kassahun, A. (2022). Deep learning for crop yield prediction: a systematic literature review. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 51(1), 1–26. <https://doi.org/10.1080/01140671.2022.2032213>
- Pearson, K. (1901). *On lines and planes of closest fit to systems of points in space*. *Philosophical Magazine*, 2(11), 559–572. <https://doi.org/10.1080/14786440109462720>
- Peres-Neto, P. R., Jackson, D. A., & Somers, K. M. (2005). How many principal components? Stopping rules for determining the number of non-trivial axes revisited. *Computational Statistics & Data Analysis*, 49(4), 974–997. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.06.015>
- Pulido Arenas, M. (2006). Análisis de riesgo financiero para el sector de la papa en Colombia. Uniandes. Disponible en: <https://hdl.handle.net/1992/9263>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Shlens, J. (2014). A Tutorial on Principal Component Analysis. arXiv:1404.1100. <https://arxiv.org/abs/1404.1100>

Siabato, W., & Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 1–22. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>

Tomek, W., & Kaiser, H. (2014). *Agricultural product prices* (5.^a ed.). Cornell University Press.

Troncoso-Sepúlveda, R. (2019). Transmisión de los precios del arroz en Colombia y el mundo. *Lecturas de Economía* (91), 151–179. <https://doi.org/10.17533/udea.le.n91a05>

Vicentín Masaro, J., & Chara, A. L. (2020). ¿Existen patrones espaciales en la fijación de precios minoristas de alimentos en los supermercados de la ciudad de Santa Fe? *Cuadernos del CIMBAGE*, 22(2), 105–143. Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires.