



MANEJO SUSTENTABLE DE TIERRAS Y SEGURIDAD ALIMENTARIA

Metodología para la zonificación de cultivos con criterios de sostenibilidad en base a la información geográfica de libre acceso para Colombia.

Methodology for crop zoning with sustainability criteria based on freely accessible geographic information for Colombia.

Metodologia para zoneamento de culturas com critérios de sustentabilidade baseados na Acesso gratuito à informação geográfica para Colômbia.

Nicolas Albarracin Bohórquez

Politécnico Grancolombiano, Colombia

nalbarracin@poligran.edu.co

Oscar Fradique Escobar Pardo

Corporación Unificada Nacional de Educación

Superior, Colombia

oscar_escobarp@cun.edu.co

Artículo científico

Enviado: 16/7/2024

Aprobado: 6/2/2025

Publicado: 28/2/2025

RESUMEN

La metodología que se propone para la zonificación de cultivos con criterios de sostenibilidad se plantea desde la investigación-acción, e inicia identificando los parámetros mínimos esperables de un modelo de producción sostenible. Posteriormente se clasifican dichos parámetros para identificar cuáles de ellos pueden ser llevados a un contexto de zonificación por medio del uso de sistemas de información geográfica y cuales dependen de la implementación de buenas prácticas por parte de los productores. Finalmente, se realiza el proceso de análisis de la información disponible y se develan las posibles fuentes de información geográfica. Por lo que se propone un modelo de zonificación con criterios de sostenibilidad que utiliza información geográfica disponible en Colombia, como datos edafológicos, climáticos, de uso del suelo, áreas protegidas, territorios indígenas y niveles de pobreza; todo ello con el objetivo de proporcionar una herramienta útil para la toma de decisiones en las cadenas productivas, fomentar la agricultura sostenible y la conservación ambiental.

Palabras clave: agricultura sostenible, planeación agrícola, sistema de información geográfica, uso del suelo

ABSTRACT

The proposed methodology for crop zoning with sustainability criteria is based on action-research and begins by identifying the minimum parameters expected from a sustainable production model. These parameters are then classified to identify which of them can be applied to a zoning context through the use of geographic information systems and which depend on the implementation of good practices by producers. Finally, the process of analyzing the available information is carried out and the possible sources of geographic information are revealed. Therefore, a zoning model with sustainability criteria is proposed that uses geographic information available in Colombia, such as soil, climate, land use, protected areas, indigenous territories and poverty levels; all with the aim of providing a useful tool for decision-making in production chains, promoting sustainable agriculture and environmental conservation.

Keywords: agricultural planning, geographic information system, land use, sustainable agriculture

RESUMO

A metodologia proposta para o zoneamento de culturas com base em critérios de sustentabilidade é baseada na pesquisa-ação e parte da identificação dos parâmetros mínimos esperados de um modelo de produção sustentável. Esses parâmetros são então classificados para identificar quais deles podem ser aplicados a um contexto de zoneamento por meio do uso de sistemas de informações geográficas e quais dependem da implementação de boas práticas pelos produtores. Por fim, realiza-se o processo de análise das informações disponíveis e revelam-se as possíveis fontes de informação geográfica. Portanto, propõe-se um modelo de zoneamento com critérios de sustentabilidade que utiliza informações geográficas disponíveis na Colômbia, como dados edafológicos, climáticos, de uso do solo, de áreas protegidas, de territórios indígenas e de níveis de pobreza; tudo isso com o objetivo de fornecer uma ferramenta útil para a tomada de decisões nas cadeias produtivas, promovendo uma agricultura sustentável e a preservação ambiental.

Palavras-chave: agricultura sustentável, planejamento agrícola, sistema de informação geográfica, uso da terra

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad y motivado por las dinámicas sociales propias de los seres humanos, la brecha entre la cantidad de personas entre las poblaciones agrícola y no agrícola, es decir, la brecha demográfica entre quienes explotan los recursos naturales para la producción de alimentos o productos derivados de la producción agropecuaria y quienes tienen otra función en la sociedad, cada vez es mayor; esto genera algún grado de presión en términos de la necesidad de optimizar los modelos de producción agropecuario para “producir más, con menos”, para este contexto, “producir más alimentos, con menos personas dispuestas para el trabajo en campo”.

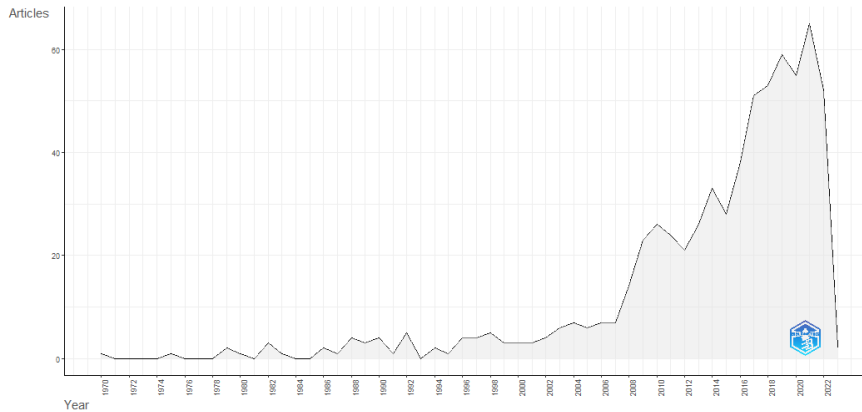
Ahora bien, si se analiza esta situación desde el crecimiento de la población humana, el Banco Mundial (2022) reportó que para el 2021 que los seres humanos estaban próximos a alcanzar los ocho mil millones de personas, y que la tasa de crecimiento anual para este mismo año era del 0,9% a nivel mundial y para Colombia de un 0,7%; este crecimiento se convierte en un problema básico de presión ejercida al medio ambiente y su utilización para el soporte de la vida en general, toda vez que dicha capacidad dependerá de factores no modificables como el clima, el suelo, la topografía, entre otros (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 1997).

Adicionalmente, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su sexto informe resalta la importancia a nivel global del sector agropecuario para la mitigación de los fenómenos asociados al calentamiento global y emisión de gases efecto invernadero; al tiempo que proporciona materias primas renovables y conserva la biodiversidad, implementando técnicas sostenibles de producción (IPCC, 2023). En este contexto se requiere de ejercicios prospectivos con enfoque sostenible, que permitan determinar la metodología adecuada de incremento de la producción de alimentos tanto en eficiencia (cantidad de toneladas de alimento en relación con el área cosechada), como de la ampliación de la frontera agrícola y/o reorganización de los sistemas productivos con miras a la reconversión del uso del suelo (zonificación de la producción).

Esta necesidad se valida al realizar un análisis de los últimos 50 años de las investigaciones reportadas en Scopus por medio del software de lenguaje estadístico R y su paquete Bibliometrix: De las poco más de 650 investigaciones relacionadas con la zonificación de cultivos y los agronegocios se puede

concluir que el interés por estos temas se incrementó considerablemente a partir del año 2000 (figura 1), lo que es congruente con la adopción de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) y su posterior evolución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

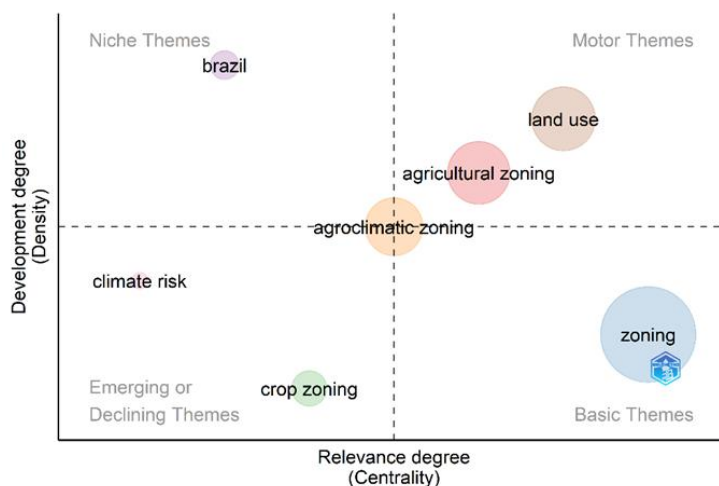
Figura 1. Producción Científica Anual asociada a la zonificación de cultivos y agronegocios.



Fuente: Elaboración propia, con base en las investigaciones reportadas en Scopus.

Resultado de este mismo análisis, se puede inferir que existen una serie de temáticas que se han convertido en motores de las investigaciones en los últimos 20 años, entre ellas: “uso del suelo”, “zonificación agrícola” y “zonificación agroclimática” (figura 2). En general, la “zonificación de cultivos” es un tema clave relacionado con el “riesgo climático,” una temática emergente de gran importancia para la planeación y el uso racional de los recursos territoriales. Esta práctica busca optimizar los requerimientos de un agrosistema productivo al considerar no solo las condiciones edafoclimáticas, sino también variables sociales y naturales que promuevan el desarrollo sostenible.

Figura 2. Mapa Temático de las investigaciones desarrolladas en los últimos 20 años.



Fuente: Elaboración propia.

Para Colombia se identificaron tres investigaciones relacionadas con ejercicios de zonificación que fueron reportadas en la base de datos de Scopus. García *et al.* (2014) proponen una metodología basada en índices agroclimáticos para el café; por otro lado, Jaimes *et al.* (2016) desarrollaron una zonificación para el cultivo de caucho desde el concepto de “zona de escape” para una enfermedad

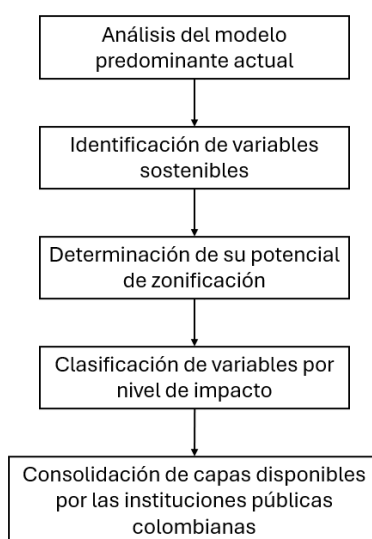
limitante del cultivo y finalmente, Martínez *et al.* (2016) proponen una metodología de zonificación agroclimática para un territorio muy específico en Colombia, el Caribe seco, la cual se centra en la relación de la aptitud del suelo y el balance hídrico. Ahora bien, existen ejercicios de zonificación relevantes como los desarrollados por Romero *et al.* (2004) aplicados en cacao y el desarrollado por Albarracín y Escobar (2019) el cual se desarrolló en el cultivo de café.

Finalmente, en Colombia se han venido desarrollando y consolidando datos geográficos, climatológicos, productivos, entre otros, que desde la visión de zonificación puede llegar a ser muy útiles, sin embargo, dicha información tiene dos características, la primera, no toda la información es pública y segundo, requiere un ejercicio de depuración para poder realizar ejercicios de zonificación efectivos. Por lo que existe la necesidad de desarrollar metodologías de zonificación basadas en el tipo y calidad de información que ha sido desarrollada en el país y que desde cualquier agronegocio o agro-cadena productiva puedan adoptar para su implementación; especialmente aquellas que cuentan con un alto número de pequeños productores, que normalmente, no cuentan con apoyo para la planeación prospectiva de sus cultivos; habiendo sido el objetivo de esta investigación desarrollar una metodología para la zonificación de cultivos en Colombia que incorpore criterios de sostenibilidad, utilizando información geográfica de libre acceso y dispuesta por las instituciones colombianas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Concebida como investigación-acción, término desarrollado por Lewis, quien la definió como “...buscaba algo útil, inmediato y aplicable para grupos sociales especialmente en desventaja” (Vargas, 2009, p. 162). En este sentido, en un primer momento se partió del análisis contextual de modelos de zonificación de cultivos existentes y su posterior evaluación de pertinencia a la luz de las categorías del enfoque de la sostenibilidad, como lo son las dimensiones ambiental (análisis del impacto ambiental del agronegocio y las medidas para su mitigación), social (análisis del impacto del agronegocio en la sociedad, abarcando tanto a las personas internas como externas a la empresa) y económica (se relaciona con la viabilidad económica del agronegocio, lo cual implica la implementación de buenas prácticas agrícolas y la optimización del rendimiento agronómico). Asimismo, se evaluó la pertinencia a la luz de algunos de los estándares de sostenibilidad que existen actualmente para la producción agrícola. De dicho análisis se identificaron las variables que caracterizan lo que es una producción agrícola sostenible; desde este punto, se determinó el potencial de zonificación, es decir, las variables que pueden ser georreferenciadas y visualizadas en una capa de un Sistema de Información Geográfica. Finalmente, estas variables zonificables se clasificaron según su nivel de impacto en el proceso de zonificación. Toda la información fue extraída de las instituciones públicas colombianas como lo son el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria y el Departamento Nacional de Planeación.

Figura 3. Metodología para el desarrollo de un nuevo modelo de zonificación.



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Zonificación de cultivos

La gestión en la producción agroindustrial de un país puede mejorar su eficiencia y sostenibilidad a través de múltiples herramientas; dentro de las cuales la zonificación de cultivos, a través de diferentes técnicas relacionadas con los sistemas de información geográfica, es de las más destacadas y usadas no solo por el sector privado, sino como estrategia gubernamental que permita hacer del sector agroindustrial una fuente de riqueza para los productores agropecuarios (Departamento Nacional de Planeación, 2014a). El enfoque de la zonificación de cultivos en múltiples investigaciones ha tenido un especial énfasis en los aspectos climáticos y edáficos; sin embargo, la concepción de la ruralidad es mucho más compleja y requiere considerar ejes sociales, culturales, ambientales e incluso políticos, toda vez que hacen parte de la identidad de un territorio y son fundamentales para su planeación integral. Sin embargo, no se puede desconocer la complejidad de la ruralidad en Colombia, en donde se hace evidente la diversidad climática y de suelos debido a su ubicación geográfica y topografía en gran parte del país (Rojas *et al.*, 2018).

Por otra parte, la zonificación de cultivos enmarcada en la visión de sostenibilidad establece el uso de la tierra agropecuaria para un uso específico, generalmente asociada a una cadena productiva; en donde se determinen espacialmente sus límites, que sea aceptable socialmente en cada territorio, viable económicamente y que no ocasione impactos negativos en los ecosistemas en donde se establezca (Echeverri, 2014). Adicionalmente se debe tener en cuenta desde la dimensión económica las dinámicas propias del mercadeo agroindustrial, en donde Colombia se destaca como un importante productor y exportador de café, cacao, flores, banano y productos tropicales (Departamento Nacional de Planeación, 2014b). Por lo tanto, la zonificación de cultivos permite optimizar las áreas idóneas para la siembra e implementación de cultivos que favorecen la producción agroindustrial acorde con la demanda internacional. Por otra parte, las perspectivas a nivel mundial no son favorables en el contexto del cambio climático, y es justamente en este contexto en el que la zonificación de cultivos puede orientar a los productores rurales en la identificación de áreas con condiciones climáticas cambiantes y/o adecuadas para cada territorio.

Sin embargo, es necesario mencionar que América del Sur es una región que registra fuertes impactos asociados al cambio climático, que pueden acrecentar la desigualdad, la pobreza multidimensional, el crecimiento demográfico y en las zonas rurales generar fuertes impactos por la deforestación, que representa la pérdida de la biodiversidad y degradación de suelos; debido a que las desigualdades económicas, étnicas y sociales se ven exacerbadas por el clima (Castellanos *et al.*, 2022).

Por último, la zonificación de cultivos es fundamental en el contexto de la soberanía y seguridad alimentaria de un país, contribuyendo a la identificación de áreas óptimas de diversas especies autóctonas que mejoren y rescaten los saberes ancestrales de las culturas y comunidades rurales, contribuyendo a territorios productivos y sostenibles con una planeación precisa a través de esta importante técnica que se describe a continuación.

Modelo predominante de zonificación

Del análisis bibliométrico se puede evidenciar que el modelo de zonificación utilizado con mayor reiteración es el desarrollado por la FAO (1997); dicha metodología se centra en tres macro actividades:

Tabla 1. Macro actividades de la metodología de zonificación de la FAO.

Actividad	Descripción	Información que otorga y/o requiere
Inventario de uso de tierras	Refleja los usos actuales de la tierra y lo correspondiente a la nueva situación que se proyecta.	Tipos de utilización de tierras Características y requerimientos de adaptabilidad de los cultivos
Inventario de recursos de tierras	Se basa en la combinación de diferentes capas de información para definir celdas agroecológicas con una única combinación de clima, suelo y otros atributos relacionados.	Información geográfica: suelos y fisiografía, clima, uso actual y cobertura vegetal, límites administrativos.
Aptitud de tierras	Paralelo entre las características propias del suelo y las necesidades propias de los cultivos; proyección de la producción potencial y rendimientos.	Aptitud agroclimática y rendimientos agronómicos potenciales Evaluación de la aptitud agroedáfica con base a limitaciones del suelo

Fuente: *Elaboración propia, con base en (FAO, 1997).*

Esta metodología se centra, principalmente, en parámetros productivos de cultivo y características agroclimáticas y de suelo de la región en estudio. Aunque vigente actualmente, se enfoca en parámetros asociados a la dimensión económica desde la óptica de la sostenibilidad, por lo que se sugiere involucrar diversos parámetros y criterios asociados a otras dimensiones de la sostenibilidad (ecológica y social) con el objeto de obtener una metodología de zonificación que responda a las necesidades del desarrollo sostenible y los ODS.

Interpretación de la sostenibilidad desde los agronegocios

La concepción del desarrollo sostenible ha evolucionado, adaptándose a los cambios de la humanidad y su entorno. Según Gutiérrez (2007), citando a Gonzalez (1997), Saldivar (1998), Godard (2002), Vivien (2005) y Smouts (2005), la sostenibilidad se ha transformado con el tiempo.

...una propuesta que integra tres dimensiones: la económica, la ecológica y la social, como resultado de un intenso esfuerzo por construir una visión integral sobre los problemas más acuciosos de la forma en que se piensa el desarrollo; recuperando la teoría del desarrollo desde la visión de la economía, hasta la etapa actual de construcción holística y multidisciplinaria del desarrollo sostenible.

Por otra parte, el mundo atraviesa por una crisis económica, ecológica y social que se recrudeció por la pandemia del Covid-19, exponiendo profundas y alarmantes grietas en todo el planeta (Mendoza *et al.*, 2021). En este contexto, la efectividad en el uso de los recursos por medio de la zonificación de cultivos, entre otras, contribuirá a mitigar los impactos asociados al cambio climático, disminuir las brechas de desigualdad entre las poblaciones del sector rural y urbano y sumarán esfuerzos para dinamizar las economías agrarias de países en vías de desarrollo.

En este contexto y para determinar cómo se puede aplicar la sostenibilidad desde la óptica de los agronegocios y en consecuencia, poder identificar los parámetros que debían ser tenidos en cuenta al momento de consolidar una metodología de zonificación de cultivos con criterios de sostenibilidad, se analizaron los estándares de sostenibilidad contemplados desde diferentes cadenas productivas como lo son (Bonsucro, 2022), (Roundtable on Sustainable Palm Oil, 2024), (Global G.A.P., 2023), (Rainforest Alliance, 2020), (International Sustainability and Carbon Certification, 2024) y (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2005), con el objeto de determinar, de manera unificada, los factores que en general se deben tener en cuenta para hacer de un agronegocio sostenible. En la tabla 2 se consolida el resultado de dicho análisis.

Tabla 2. Interpretación de la sostenibilidad desde los agronegocios.

Aspecto de la sostenibilidad	Interpretación	Variables
Económico	Está relacionado con la viabilidad económica del cultivo, lo que se traduce en las buenas prácticas agrícolas y la optimización del rendimiento agronómico	Tipo de suelo y su conservación. Elementos y factores climáticos. Manejo integrado de plagas y enfermedades. Manejo de la fertilidad. Manejo hídrico del cultivo. Cumplimiento de los aspectos legales.
Ambiental	Análisis del impacto del agronegocio hacia el ambiente y su consecuente mitigación	Preservación de áreas de alto valor de conservación ¹ y altas reservas de carbono. Gestión de residuos. Prácticas de conservación de suelos. Manejo de la calidad y cantidad de agua.

¹ Las áreas de alto valor de conservación se han clasificado en seis tipos diferentes: 1. Por presencia de diversidad de especies, 2. Ecosistemas y mosaicos a escala de paisaje, 3. Ecosistemas y hábitats raros o amenazados, 4. Por servicios ecosistémicos, 5. Por necesidades de las comunidades y 6. Por valores culturales.

		Contaminación y gases de efecto invernadero.
Social	Análisis del impacto del agronegocio hacia la sociedad, entendida como las personas externas e internas del negocio.	Preservación de los derechos humanos. Evaluación y compensación de posibles conflictos sociales por uso del suelo. Contribución al desarrollo local. Condiciones laborales adecuadas. Entorno de trabajo seguro.

Fuente: *Elaboración propia. Con base en* (Bonsucro, 2022), (Roundtable on Sustainable Palm Oil, 2024), (Global G.A.P., 2023), (Rainforest Alliance, 2020), (International Sustainability and Carbon Certification, 2024) y (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2005).

Modelo de zonificación con criterios sostenibles

Clasificación de variables zonificables

Una vez identificadas las variables generales que son tenidas en cuenta al momento de establecer o considerar un agronegocio como “sostenible” es pertinente determinar que no todas estas variables pueden ser representadas en un sistema de información geográfica para efectos del ejercicio de zonificación; así las cosas, se realizó una clasificación de variables entre las “zonificables” cuyo rasgo común es información que puede ser representada en un SIG y las “no zonificables”, las cuales son variables que su aplicabilidad dependerá de los procedimientos y buenas prácticas que desde el agronegocio se implemente. En la tabla 3 se presentan las variables zonificables y no zonificables.

Tabla 3. Aspectos de sostenibilidad relacionados con variables zonificables.

Aspecto de la sostenibilidad	Variables	Zonificable
Económico	Tipo de suelo y su conservación	Si
	Elementos y factores climáticos	Si
	Manejo Integrado de plagas y enfermedades	No
	Manejo de la fertilidad	No
	Manejo hídrico del cultivo	No
	Cumplimiento de los aspectos legales	Parcialmente*
Ambiental	Preservación de áreas de alto valor de conservación y altas reservas de carbono	Si
	Preservación de la biodiversidad	Si
	Gestión de residuos	No
	Prácticas de conservación de los suelos	No
	Manejo de la calidad y cantidad de agua	No
	Contaminación y gases de efecto invernadero	No
Social	Preservación de los derechos humanos	No
	Evaluación y compensación de posibles conflictos sociales por uso del suelo	Parcialmente*
	Contribución al desarrollo local	No
	Condiciones laborales adecuadas	No
	Entorno de trabajo seguro	No

Fuente: *Elaboración propia.*

Enfatizando en la variable de cumplimiento de aspectos legales, relacionada en el aspecto económico, se determina como parcialmente zonificable, toda vez que el cumplimiento legal se puede entender desde diferentes perspectivas como temas de tierras, o cumplimientos de responsabilidades con el estado, entre otros; en ese sentido, podría ser zonificable si desde lo legal existe alguna restricción de uso del suelo relacionado con los planes de ordenamiento territorial.

Por otro lado, respecto a la variable de evaluación y compensación de posibles conflictos sociales por uso del suelo, la zonificación puede ser una herramienta para identificar áreas que puedan llegar a tener algún grado de afectación social, como territorios indígenas, zonas de reserva campesina, entre otros, pero no es posible determinar las compensaciones o evaluar el grado de posible conflicto existente, estas últimas dependerán de las dinámicas propias del agronegocio.

Impacto de las variables zonificables en el modelo de zonificación con criterios de sostenibilidad

Finalmente, en el ejercicio de identificación y selección de variables, se determinó que dentro del grupo de variables zonificables, existían algunas que son totalmente restrictivas o que delimitan las áreas con potencial productivo, otras variables que delimitan y a su vez clasifican la potencialidad productiva de un territorio, es decir, que identifican en donde se puede producir cierto modelo productivo y con qué nivel de potencial (alto, medio o bajo); y otras que no determinan la posibilidad o no de desarrollar un modelo productivo específico pero, por aspectos ambientales si requerirían de un esfuerzo adicional para llevar a cabo el agronegocio. En la siguiente tabla se muestra el nivel de impacto de las variables seleccionadas.

Tabla 4. Nivel de impacto de las Variables zonificables.

Aspecto de la sostenibilidad	Variables	Nivel de Impacto
Económico	Tipo de suelo y su conservación	Delimita y clasifica
	Elementos y factores climáticos	Delimita y clasifica
	Cumplimiento de los aspectos legales (Plan de Ordenamiento Territorial)	Delimita
Ambiental	Preservación de áreas de alto valor de conservación y altas reservas de carbono	Delimita
	Evaluación y compensación de posibles conflictos sociales por uso del suelo (territorios indígenas y reservas campesinas)	Área de manejo especial
Social	Evaluación y compensación de posibles conflictos sociales por uso del suelo (comunidades vulnerables)	Área de Manejo Especial
	Pobreza multidimensional y monetaria	Área de Manejo Especial

Fuente: *Elaboración propia.*

Se define los territorios indígenas y las reservas campesinas como áreas de manejo especial, toda vez que, si al realizar el ejercicio de zonificación se identifica que dentro de las zonas potenciales existen territorios bajo estas características, se podría generar un agronegocio cooperativo y/o asociativo con campesinos o pueblos indígenas, pero bajo parámetros sociales respetuosos e incluyentes. En esa misma lógica se debe analizar la presencia de comunidades vulnerables y áreas con presencia de alta pobreza.

Información geográfica disponible para las variables zonificables

Posterior al análisis de las diversas fuentes de información geográfica disponible en Colombia se consolidaron y seleccionaron las siguientes capas para la implementación del modelo de zonificación con criterios de sostenibilidad; esta selección parte del principio de existencia, es decir que, dentro de las capas disponibles en las instituciones son las que se ajustan a las variables que el modelo de zonificación ha determinado (tabla 5).

Tabla 5. Información geográfica seleccionada y fuente de información.

Criterio de sostenibilidad	Variables	Capa de Información Geográfica*	Fuente
Económico	Tipo de suelo y su conservación	Edafología	IGAC
	Elementos y factores climáticos	Zonificación climática (temperatura, clima y precipitación)	IDEAM
	Cumplimiento de los aspectos legales (Plan de Ordenamiento Territorial)	Uso del suelo	IGAC
Ambiental	Preservación de áreas de alto valor de conservación y altas reservas de carbono.	Áreas protegidas	Ministerio de Ambiente
Social	Evaluación y compensación de posibles conflictos sociales por uso del suelo (territorios indígenas y reservas campesinas)	Territorios indígenas	UPRA
	Pobreza multidimensional y monetaria	Índices de pobreza	DNP

Nota: *Esta información geográfica se selecciona desde las necesidades básicas del modelo de zonificación desarrollado y desde la existencia en las fuentes colombianas, sin embargo, no excluye la posibilidad de utilizar información adicional para robustecer la zonificación como pendientes, hotspot de biodiversidad, áreas con concesiones petroleras y/o mineras, zonas de riesgos, entre otras.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 5 es el resultado de la propuesta realizada para la zonificación de cultivos desde la óptica de la sostenibilidad desde las tres dimensiones anteriormente analizadas.

DISCUSIÓN

La dimensión económica en la implementación de cultivos, tradicionalmente se ha enfocado en los principales aspectos técnicos como los factores y elementos climáticos, condiciones óptimas del suelo y el cumplimiento de la normatividad del territorio principalmente; en donde se establecería el agronegocio propuesto. Al incorporarse la dimensión ambiental (ecológica), es necesario priorizar la conservación de la biodiversidad, debido a que Colombia es uno de los países más biodiversos del planeta; contando con más de 25 000 especies diferentes de planta superiores, más de 5 000 especies de vertebrados y casi 5 000 especies de invertebrados, según el Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia de Recursos Biológicos (Moreno *et al.* 2017).

Aunado a estas cifras, se debe recalcar la conservación y protección de los bosques primarios amazónicos, enmarcados en la normatividad de áreas protegidas de Colombia; que no son solo una necesidad importante de protección, sino una decisión urgente de aplicación, teniendo en cuenta las tasas de deforestación anuales debido a la presión que la frontera agrícola cede en múltiples territorios de Colombia. Es necesario rescatar los principales motores de deforestación del bosque amazónico que el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural menciona, iniciando por la praderización (a través del acaparamiento de tierras), los cultivos de uso ilícito, los incendios forestales, la ganadería extensiva y la extracción ilícita de minerales (Alzate, 2022). Por lo tanto, incluir como un criterio de sostenibilidad las áreas protegidas no es una opción en esta investigación, sino una necesidad imperante.

Por otra parte, pero no menos importante, es necesario mencionar que la presencia de pueblos indígenas, palenqueras y ancestrales en Colombia es tan relevante que adicional al lenguaje español, se hablan más de 50 lenguas oficiales que forman parte del patrimonio inmaterial, cultural y espiritual de Colombia (Ministerio de Cultura, 2019). Estas cifras representan la diversidad cultural y ancestral de múltiples comunidades que habitan la Colombia profunda y que por lo tanto al realizarse el ejercicio de zonificación de cultivos deben ser involucradas como parte de los territorios indígenas, palenqueros y ancestrales (UNESCO, 2021). Por último, a pesar de destacar a Colombia como una potencia mundial de la vida debido a su biodiversidad y multiculturalidad, es necesario recalcar que también lidera el ranking de los países más desiguales de Latinoamérica y el mundo (Banco Mundial, 2024). En este contexto incluir dentro de la dimensión social los indicadores de pobreza monetaria y multidimensional es un acierto contundente, debido a que gran parte de la pobreza del país se ve reflejada en la ruralidad colombiana (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2022).

Aunque no todas las variables consideradas en esta investigación son zonificables en un sistema de información geográfica, esta limitación no invalida los resultados ni su contribución. Las variables no zonificables, aunque no representadas directamente en mapas, aportan un contexto crucial para la sostenibilidad del agronegocio, dado que reflejan dinámicas y prácticas que influyen directamente en los ODS en los ámbitos social, ecológico y económico. Este enfoque complementario responde a la complejidad de las dimensiones de la sostenibilidad y trasciende las metodologías tradicionales centradas únicamente en datos geoespaciales o productivos.

En ese sentido, la metodología propuesta rompe paradigmas históricos de zonificación, como el enfoque de la FAO (1997), centrado exclusivamente en variables de suelo y productividad, o estudios más recientes como los de Ali *et al.* (2022) y Sivasankari *et al.* (2020), que priorizan aspectos meteorológicos o productivos, o investigaciones desarrolladas por Xue-Yuan *et al.*, (2018). Al integrar criterios ecológicos, económicos y sociales, esta propuesta presenta una visión más holística y contextualizada, alineada con las necesidades actuales de sostenibilidad. Por tanto, el valor de esta investigación radica no solo en los resultados representados en el SIG, sino en su capacidad para articular variables complementarias que, aunque no sean geoespaciales, son fundamentales para la toma de decisiones en la agricultura sostenible.

CONCLUSIONES

Con la consolidación de esta metodología se otorga una herramienta útil y efectiva para la toma de decisiones por parte de los actores de las cadenas productivas; con una capacitación adecuada en el uso de los sistemas informacionales, existe la posibilidad que de manera autónoma se logre generar una proyección de zonificación útil para la adecuada planeación estratégica de la producción del país.

A diferencia de investigaciones que emplean software de licencia paga, esta investigación reafirma la idea que el uso de información geográfica y de software de libre acceso facilita la democratización de los datos necesarios para llevar a cabo la zonificación de cultivos en economías en vía de desarrollo como la colombiana; esta idea se refuerza en aquellas cadenas productivas que por falta de institucionalidad no han desarrollado una estrategia macro que permita orientar los esfuerzos de fortalecimiento y crecimiento de las áreas cultivadas.

Se proyecta un alto potencial en la aplicación de esta metodología a nivel nacional en Colombia; esta beneficiará las cadenas productivas que históricamente no han sido el centro de los procesos investigativos y en las que particularmente se concentra un alto número de pequeños agricultores y económicas campesinas. La disponibilidad de información geográfica de libre acceso y la implementación de esta metodología en políticas agrícolas y planes de desarrollo rural pueden mejorar significativamente la productividad agrícola, reducir los riesgos ambientales y promover un uso más eficiente de los recursos naturales.

Aunque esta metodología representa un avance significativo en la planificación de la agricultura sostenible en Colombia, es importante reconocer que depende significativamente de la liberación de información actualizada por parte de las instituciones públicas y privadas que la consolidan, así mismo, se debe reconocer que con la volatilidad actual en el contexto ambiental del país, especialmente en lo referido a lo socio-políticos, es probable que las regulaciones y leyes cambien constantemente, lo que generaría una probable desactualización de la información de libre acceso de manera prematura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albarracin, N. y Escobar, O. (2019). Zonificación para la producción agroforestal del café (*Coffea arábica* L.) en el municipio de Policarpa, departamento de Nariño - Colombia. En F. Díaz, L. A. Carvbajalln y O. F. Cuadro (Ed.), *Saberes emergentes para la cuarta revolución industrial* (pp. 39-58). Corporación Universitaria del Huila, Corhuila. <https://acortar.link/FgHP99>
- Ali, A., Rondelli, V., Martelli, R., Falsone, G., Lupia, F., & Barbanti, L. (2022). Management Zones Delineation through Clustering Techniques Based on Soils Traits, NDVI Data, and Multiple Year Crop Yields. *Agriculture*, 12(2), e231. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020231>
- Alzate, L. (2022). *Análisis de la deforestación en Colombia desde la Curva Ambiental de Kuznets* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://acortar.link/Awpl10>
- Banco Mundial. (2022). *Crecimiento de la población (%) anual*. <https://acortar.link/vKoUMk>
- Banco Mundial. (2024). *Tendencias Recientes de Pobreza y Desigualdad América Latina y el Caribe. Octubre 2024*. <https://acortar.link/oUz30o>
- Bavish, S., Geethalakshmi, V., Kokilavani, S., Gowtham, R., Bhuvanewari, K., Ramanathan, S. P. B. Sivasankari, B., Kalpana, M., Vasanthi, R., M., Ilamaram, M., R. Pangayar, R., Selvi, R. & Sujatha, R. (2020). Delineation of Efficient Cropping Zone for Onion over Tamil Nadu. *Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews. Journal of Agrometeorology*, 22(S1), 39–42. <https://acortar.link/gWzPv9>
- Bonsucro. (2022). *Production Standard*. Bonsucro. <https://bonsucro.com/production-standard>

- Castellanos, E., Lemos, M., Astigarraga, L., Chacon, N., Cuvi, N., Huggel, C., Miranda, L., Moncassim Vale, M., Ometto, J., Peri, P., Postigo, J., Ramajo, L., Roco, L., & Rusticucci, M. (2022). Central and South America. In *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1835-1927). Cambridge University Press. <https://acortar.link/4YuN9j>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2022). *Informe de pobreza monetaria y multidimensional en Colombia 2022*. <https://acortar.link/8UirHq>
- Departamento Nacional de Planeación. (2014a). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018*. <https://acortar.link/lmPKOP>
- Departamento Nacional de Planeación. (2014b). *Marco conceptual de la Misión para la Transformación del Campo*. 46. <https://acortar.link/qu5cbQ>
- Echeverri, R. (2014). *Estructura del plan de ordenamiento social de la propiedad rural*. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria. Colombia. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36439>
- García L., J. C., Posada-Suárez, H. & Läderach, P. (2014). Recommendations for the Regionalizing of Coffee Cultivation in Colombia: A Methodological Proposal Based on Agro-Climatic Indices. *Plos ONE*, 9(12), e113510. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0113510>
- García, J., Romero, M., García, J. y Astrid, L. (2004). *Caracterización y zonificación de áreas potenciales para el cultivo del cacao en Colombia: dirección de cadenas productivas cadena de cacao - chocolate*. Biblioteca Digital Agropecuaria de Colombia. <https://acortar.link/GANUL3>
- Global G.A.P. (2023). *Resumen de la norma de Aseguramiento Integrado de Fincas (IFA) V6*. <https://acortar.link/4oBIRo>
- Gutiérrez, E. (2007). De las teorías del desarrollo al desarrollo sustentable. Historia de la construcción de un enfoque multidisciplinario. *Trayectorias*, 9(25), 45-60. <https://acortar.link/qLPJM7>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Sections. In Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (35-115). Switzerland. <https://acortar.link/GmZ3JW>
- International Sustainability and Carbon Certification. (2024). *ISCC System Documents*. <https://acortar.link/rvOmYD>
- Jaimes, Y., Rojas, J., Cilas, C., & Furtado, E. L. (2016). Suitable climate for rubber trees affected by the South American Leaf Blight (SALB): Example for identification of escape zones in the Colombian middle Magdalena. *Crop Protection*, 81, 99–114. <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2015.12.016>
- Liu, L., Xiao, X., Qin, Y., Wang, J., Xu, X., Hu, Y., & Qiao, Z. (2020). Mapping cropping intensity in China using time series Landsat and Sentinel-2 images and Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111624. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111624>
- Martínez M, F. E., Deantonio F, L. Y., Araujo C, G. A., Rojas, E. O., Gómez-Latorre, D. A., Alzate, D. F., Ortiz, L. A., Aguilera G, E., Boshell-Villamarin, J. F., Martínez M, F. E., Deantonio F, L. Y., Araujo C, G. A., Rojas, E. O., Gómez-Latorre, D. A., Alzate, D. F., Ortiz, L. A., Aguilera G, E. & Boshell-Villamarin,

- J. F. (2016). Agroclimatic zoning methodology for agricultural production systems in dry Caribbean region of Colombia. *Agronomía Colombiana*, 34(3), 374-384. <https://doi.org/n8hm>
- Mendoza Morales, L. F., Escobar Pardo, O. F., Albarracín Bohorquez, N., y Mancera Rodríguez, L. P. (2021). La Pandemia COVID-19 como factor renovador del Modelo de Desarrollo Rural en Colombia. *Perspectivas Rurales Nueva Época*, 19(38), 1-26. <https://doi.org/10.15359/prne.19-38.1>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2005). *Sello Ambiental Colombiano*. <https://acortar.link/bQ6AD1>
- Ministerio de Cultura. (2019). *Lenguas nativas y diversidad cultural en Colombia*. <https://acortar.link/akp8Ut>
- Moreno, L. A., Andrade, G. I., y Ruíz-Contreras, L. F. (2017). *Biodiversidad 2016. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <https://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2016>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (1997). *Zonificación agroecológica. Guía general*. <http://www.fao.org/docrep/W2962S/W2962S00.htm>
- Rainforest Alliance. (2020). *2020 Certification Program*. Rainforest Alliance. <https://acortar.link/fBXWPs>
- Rojas, S., Muñoz, T. y Albarracín, N. (2018). *Ruralidad en Colombia* (1ra ed.). Universidad Central Colombia.
- Roundtable on Sustainable Palm Oil. (2014). *2024 Standards Implementation*. <https://acortar.link/JmXoq7>
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. (2021). *Informe sobre el patrimonio cultural inmaterial en Colombia*. <https://acortar.link/C9Pc6B>
- Vargas, Z. R. (2009). *La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica*. *Educación*, 33(1), 155–165. <https://acortar.link/DlcKIL>
- Xue-Yyuan, H., Chun-yi, W., Dong-sheng, D., Kui-dong, L., & Xie Bai-cheng. (2018). Climatic risk zoning of double cropping super rice cultivation in Hhunan province. *Journal of Tropical Meteorology*, 24(2), 199–208. <https://acortar.link/OrRiB5>