Miscelánea

water and landscape
AGUA y TERRITORIO

Impacto de las actividades antropogénicas en la cobertura del suelo de la cuenca del río Quilichao (Colombia): análisis y proyecciones para 2030 y 2050

Impact of anthropogenic activities on land cover in the Quilichao river basin (Colombia): analysis and projections for 2030 and 2050

David Alejandro Muñoz
Universidad del Valle
Cali, Colombia
david.a.munoz@correounivalle.edu.co
ORCID: 0000-0003-1769-7070

Yesid Carvajal Escobar
Universidad del Valle
Cali, Colombia
yesid.carvajal@correounivalle.edu.co
ORCID: 0000-0002-2014-4226

Elkin de Jesús Salcedo Hurtado
Universidad del Valle
Cali, Colombia
elkin.salcedo@correounivalle.edu.co
ORCID: 0000-0002-6753-7094

Información del artículo
Recibido: 14/08/2024
Revisado: 31/07/2025
Aceptado: 01/08/2025
Online: 30/06/2026
Publicado: 10/07/2026

ISSN 2340-8472
ISSNe 2340-7743
DOI 10.17561/at.31.9131

CC-BY

© Universidad de Jaén (España)

RESUMEN

El crecimiento demográfico y actividades como la urbanización, minería y agricultura han provocado cambios significativos en el uso y cobertura del suelo (LULC) en la cuenca del río Quilichao, en Cauca, Colombia. Para evaluar y predecir estos cambios, se aplicaron tecnologías geoespaciales durante el periodo 2018-2021. Las proyecciones para los años 2030 y 2050 se realizaron utilizando el modelo de autómatas celulares y redes neuronales artificiales (CA-ANN) del complemento MOLUSCE de QGIS. Los mapas LULC mostraron una alta precisión, con coeficientes Kappa superiores a 0,97. Entre 2019 y 2050, se proyecta una disminución de 488.65 ha de vegetación densa y un aumento de 638,16 ha en cultivos, tendencia que se espera continúe con un incremento adicional de 330,21 ha de cultivos para 2030 y 435,42 ha para 2050. Este análisis ofrece una herramienta crucial para la formulación de políticas orientadas al desarrollo sostenible y la gestión efectiva del ecosistema.

PALABRAS CLAVE: Cobertura de suelos, Cultivo, Desarrollo sostenible, Cuenca hidrográfica.

ABSTRACT

Population growth and activities such as urbanization, mining, and agriculture have caused significant changes in land use and land cover (LULC) in the Quilichao River Basin, Cauca, Colombia. To evaluate and predict these changes, geospatial technologies were applied during the period 2018-2021. Projections for the years 2030 and 2050 were made using the cellular automata and artificial neural networks (CA-ANN) model from the MOLUSCE plugin in QGIS. The LULC maps showed high accuracy, with Kappa coefficients above 0.97. Between 2019 and 2050, a decrease of 488.65 ha in dense vegetation and an increase of 638.16 ha in crops are projected, a trend expected to continue with an additional increase of 330.21 ha in crops by 2030 and 435.42 ha by 2050. This analysis provides a crucial tool for policy formulation aimed at sustainable development and effective ecosystem management.

KEYWORDS: Land cover, Cultivation, Sustainable development, Watershed.

Impacto das atividades antropogênicas na cobertura do solo da bacia do rio Quilichao (Colombia): análise e projeções para 2030 e 2050

RESUMO

O crescimento populacional e atividades como urbanização, mineração e agricultura causaram mudanças significativas no uso e cobertura do solo (LULC) na bacia do rio Quilichao, Cauca, Colômbia. Para avaliar e prever essas mudanças, foram aplicadas tecnologias geoespaciais durante o período de 2018-2021. As projeções para os anos 2030 e 2050 foram realizadas utilizando o modelo de autômatos celulares e redes neurais artificiais (CA-ANN) do complemento MOLUSCE no QGIS. Os mapas LULC mostraram alta precisão, com coeficientes Kappa superiores a 0,97. Entre 2019 e 2050, projeta-se uma diminuição de 488,65 ha de vegetação densa e um aumento de 638,16 ha em cultivos, tendência que se espera continuar com um aumento adicional de 330,21 ha em cultivos até 2030 e 435,42 ha até 2050. Esta análise oferece uma ferramenta crucial para a formulação de políticas voltadas para o desenvolvimento sustentável e gestão eficaz do ecossistema.

PALAVRAS-CHAVE: Cobertura do solo, Cultivo, Desenvolvimento sustentável, Bacia hidrográfica.

Impact des activités anthropiques sur la couverture terrestre du bassin du río Quilichao (Colombia) : analyse et projections pour 2030 et 2050

RÉSUMÉ

La croissance démographique et des activités telles que l'urbanisation, l'exploitation minière et l'agriculture ont provoqué des changements significatifs dans l'utilisation et la couverture des sols (LULC) dans le bassin de la rivière Quilichao, Cauca, Colombie. Pour évaluer et prédire ces changements, des technologies géospatiales ont été appliquées pendant la période 2018-2021. Les projections pour les années 2030 et 2050 ont été réalisées en utilisant le modèle d'automates cellulaires et de réseaux neuronaux artificiels (CA-ANN) du complément MOLUSCE dans QGIS. Les cartes LULC ont montré une grande précision, avec des coefficients Kappa supérieurs à 0,97. Entre 2019 et 2050, une diminution de 488,65 ha de végétation dense et une augmentation de 638,16 ha de cultures sont projetées, une tendance qui devrait se poursuivre avec une augmentation supplémentaire de 330,21 ha de cultures d'ici 2030 et 435,42 ha d'ici 2050. Cette analyse fournit un outil crucial pour la formulation de politiques axées sur le développement durable et la gestion efficace des écosystèmes.

MOTS-CLÉS : Couverture des sols, Culture, Développement durable, Bassin versant.

Impatto delle attività antropiche sulla copertura del suolo del bacino del fiume Quilichao (Colombia): analisi e proiezioni per il 2030 e 2050

SOMMARIO

La crescita demografica e attività come l'urbanizzazione, l'estrazione mineraria e l'agricoltura hanno provocato cambiamenti significativi nell'uso e nella copertura del suolo (LULC) nel bacino del fiume Quilichao, Cauca, Colombia. Per valutare e prevedere questi cambiamenti, sono state applicate tecnologie geospaziali durante il periodo 2018-2021. Le proiezioni per gli anni 2030 e 2050 sono state effettuate utilizzando il modello di automi cellulari e reti neurali artificiali (CA-ANN) del plugin MOLUSCE in QGIS. Le mappe LULC hanno mostrato un'elevata precisione, con coefficienti Kappa superiori a 0,97. Tra il 2019 e il 2050, si prevede una diminuzione di 488,65 ha di vegetazione densa e un aumento di 638,16 ha di colture, una tendenza che dovrebbe continuare con un ulteriore incremento di 330,21 ha di colture entro il 2030 e 435,42 ha entro il 2050. Questa analisi fornisce uno strumento cruciale per la formulazione di politiche orientate allo sviluppo sostenibile e alla gestione efficace dell'ecosistema.

PAROLE CHIAVE: Copertura del suolo, Coltivazione, Sviluppo sostenibile, Bacino idrografico.

Introducción

Las actividades humanas han influido enormemente en la forma en que se utiliza y se cubre la tierra a lo largo de los siglos, dando lugar a cambios relevantes en el uso y cobertura del suelo (LULC, por sus siglas en inglés). Estos impactos antropogénicos han alterado procesos ecológicos críticos dentro del sistema terrestre. En las últimas décadas, se ha observado un marcado aumento en los cambios de LULC a nivel global, impulsado principalmente por el rápido crecimiento demográfico y las consecuencias asociadas, como la sobreexplotación de los recursos naturales[1]. Para comprender la magnitud y dirección de estas transformaciones, es fundamental distinguir entre los conceptos de uso y cobertura del suelo, ya que ambos describen aspectos complementarios de la interacción sociedad-naturaleza[2]. El uso del suelo se refiere a las actividades humanas que se realizan sobre una superficie determinada, mientras que la cobertura del suelo describe las características físicas observables de dicha superficie.

El cambio en el uso y la cobertura del suelo (LULC) se ha consolidado como un campo importante para investigación en las ciencias ambientales, la geografía y la planificación territorial, debido a sus profundos efectos sobre los ecosistemas, los patrones climáticos y el bienestar humano[3]. Este fenómeno comprende transformaciones asociadas a la variación de la cobertura vegetal, las prácticas de manejo del suelo y procesos como la expansión urbana y agrícola. Bajo esta afirmación, la modelación espacio-temporal del cambio en el uso y cobertura del suelo han pasado a ser en una herramienta fundamental para anticipar escenarios futuros y apoyar la toma de decisiones en la gestión territorial. Entre los enfoques más utilizados se encuentran los modelos de regresión[4], las cadenas de Markov[5] y los autómatas celulares[6], los cuales permiten simular patrones complejos de transformación del paisaje.

Con el avance computacionales y la inteligencia artificial, estos modelos han ido fortalecidos mediante la integración de algoritmos de aprendizaje automático, como las redes neuronales artificiales[7], las máquinas de vectores de soporte[8] y los algoritmos genéticos[9], incrementado su capacidad predictiva. En particular, el modelo CA-ANN ha demostrado ser eficaz para integrar dinámicas espaciales y temporales en la simulación de escenarios futuros de LULC[10]. En esta investigación, se empleó el complemento MOLUSCE del software QGIS, el cual permite realizar simulaciones basadas en datos de teledetección y variables espaciales. Diversos estudios han evidenciado, que a partir de estas técnicas la expansión agrícola ha sido uno de los principales motores de pérdida de hábitats naturales, lo que ha alterado la configuración espacial de los ecosistemas, la provisión de servicios ambientales y la adaptación ecológica a nivel regional[11].

Sin embargo, además del avance de la frontera agrícola, el crecimiento precipitado de la población y la expansión urbana han promovido otros factores en la transformación del paisaje. Según proyecciones de Naciones Unidas, se espera que la población mundial aumente aproximadamente un 60 % para el año 2050. Hasta la fecha, la expansión de la población urbana se ha documentado en casi todas las naciones del mundo y ha sido identificado como una de las principales causas de cambios abruptos en el LULC[12].

Actualmente, se observa una transición de múltiples coberturas naturales hacia usos residenciales y otras actividades antropogénicas, lo que ha provocado pérdidas globales de bosques y pastizales del 19 % y 8 %, respectivamente, a pesar de que las construcciones humanas sólo ocupan el 6 % de la superficie terrestre[13].

Estas alteraciones en el LULC generan efectos adversos sobre el medio ambiente, como el aumento de la temperatura superficial, variaciones en la humedad relativa, mayor evaporación y patrones de precipitación impredecibles, lo cual repercute negativamente en la biodiversidad, la calidad del agua y del suelo, y el funcionamiento de los ecosistemas[14]. Todo ello contribuye al cambio climático global[15]. Ante este panorama, es fundamental comprender las causas y patrones del cambio de LULC para promover una planificación urbana más eficaz y una gestión sostenible de los recursos naturales.

[1] Mulatu; Hundera; Senbeta, 2024.
[2] Verburg et al., 2009. Baghel et al., 2024.
[3] Roy et al., 2022.
[4] Hu; Lo, 2007.
[5] Arsanjani; Kainz, Mousivand, 2011.
[6] Chen et al., 2016.
[7] Li; Yeh, 2002.
[8] Yang; Li; Shi, 2008.
[9] Li et al., 2013.
[10] Saputra; Lee, 2019. Alam et al., 2021.
[11] Mulatu; Hundera; Senbeta, 2024.
[12] Baghel et al., 2024.
[13] Anand; Oinam, 2020.
[14] Kafy et al., 2019.
[15] Hamad; Balzter; Kolo, 2018. Hamad; Kolo; Balzter, 2018. Liu et al., 2020. Majumder et al., 2023.

La región de estudio, la cuenca rio Quilichao es una cuenca periurbana que está experimentando un rápido aumento demográfico según las proyecciones proporcionadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia[16]. Este crecimiento poblacional tiene implicaciones directas en la demanda de servicios, infraestructuras y recursos básicos, como el agua, y el suelo, lo que sugiere la necesidad de políticas y estrategias diferenciadas para abordar las distintas realidades socioeconómicas. Además, el nivel de desarrollo económico y social del municipio influirá en la capacidad de la comunidad para acceder a servicios esenciales, educación y oportunidades laborales. La comprensión de estos aspectos demográficos y desarrollo es fundamental para la formulación de políticas públicas, la asignación eficiente de recursos y la implementación de medidas que promuevan un desarrollo sostenible y equitativo en el municipio.

Este rápido cambio en la tierra ha remodelado el paisaje, reflejando la evolución de las necesidades y actividades dentro de la región[17]. Esta mala gestión podría tener efectos perjudiciales sobre la calidad de vida dentro de la zona. Las consecuencias pueden incluir un aumento riesgos de desastres naturales como deslizamientos de tierra e inundaciones debido a asentamientos no regulados, industrias y fábricas con condiciones inadecuadas sistemas de alcantarillado, así como el potencial de incendios causados por calles congestionadas, entre otros desafíos.

Es por ello que esta investigación centro en el análisis de factores geográficos que influyen en el cambio distintivo procesos de LULC explorando la conversión de estas zonas geográficas en una simulación y predicción precisas de un modelo para futuros cambios de suelo, empleando el CA-ANN, un enfoque novedoso no utilizado anteriormente en el área bajo investigación. Los objetivos principales de este estudio son tres:

(1) analizar los cambios espaciotemporales en LULC dentro de la cuenca entre 2018 y 2021
(2) emplear el modelo CA-ANN para pronosticar LULC en los años 2030 y 2050
(3) demostrar el potencial impacto de estos cambios en la futura planificación del uso de la tierra

Es de destacar que, hasta la fecha, ninguna investigación previa en la región ha empleó el modelo CA-ANN para predecir LULC futuros cambios. Es crucial para los reguladores, administradores de recursos y organismos gubernamentales para monitorear activamente estos modelos espaciotemporales para anticipar cambios en la estructura del paisaje y garantizar la utilización sostenible de los recursos naturales.

Metodología

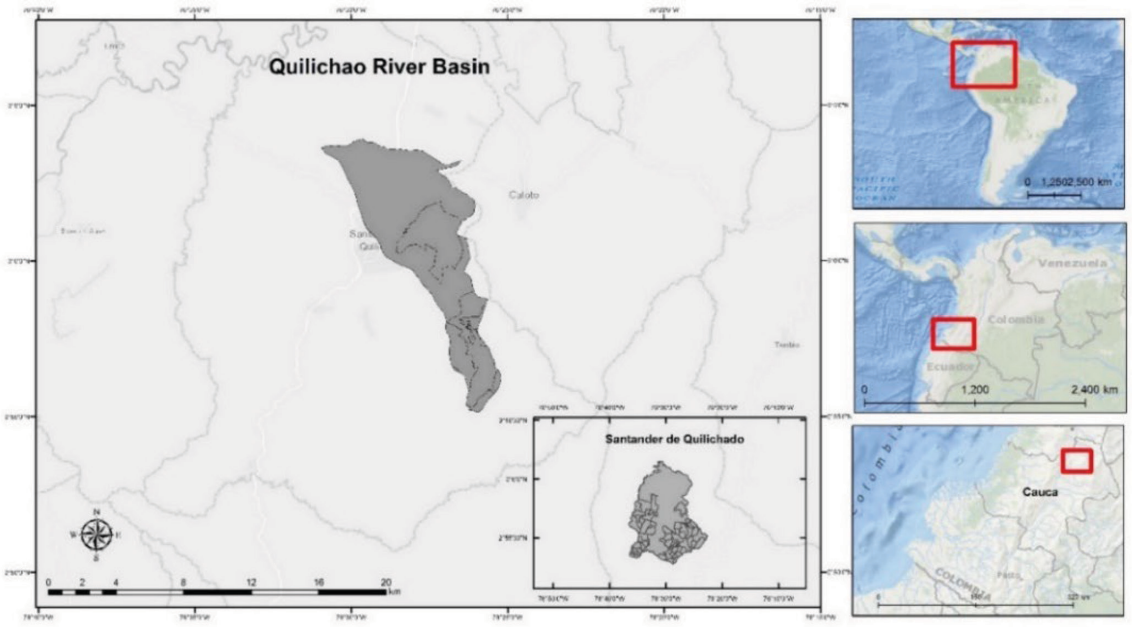
Localización y descripción de la zona de estudio

La cuenca rio Quilichao hace parte del territorio de la reserva natural Munchique los Tigres, se encuentra localizada al norte del departamento del Cauca, sobre el flanco occidental de la cordillera central, entre las elevaciones 960 y 2600 msnm y las coordenadas 3° 03’ y 3° 02’ de latitud norte y 76° 15’ y 76° 18’ de longitud oeste y, tiene un área aproximada de 2.300 ha (Figura 1). Por su parte, el río Quilichao cuenta una longitud de cauce de 23 km, con pendiente promedio de 8,4 % hasta el área urbana del municipio. Tiene un patrón de drenaje completo en la parte alta y en su zona de ladera, con alta densidad lo cual da una máxima potencialidad de producción hídrica. Sus afluentes más importantes son: quebrada La Arenosa, quebrada La Balsera, quebrada La Antolina, quebrada la Polinaria, y quebrada Pavitas. Estas fuentes son utilizadas en la parte alta de la cuenca para abastecimiento doméstico a través de pequeños acueductos y para usos agropecuarios, en la parte media se encuentran los mayores consumos debido a la presencia de predios con mayor extensión que los encontrados en la zona alta, igualmente para consumo humano de las veredas San Pedro y Cambalache y la demanda del acueducto urbano del municipio de Santander de Quilichao[18].

El municipio tiene una población estimada de 95.041 personas. De esa cantidad, alrededor de 54.362 personas viven en el área urbana, siendo la parte principal del municipio, lo que representa aproximadamente el 59,20 %. Por otro lado, la zona rural alberga cerca de 40.679 habitantes equivalentes al 42,80 %. Las características y la forma en la cual avanza esta población afectan los planes y manejos de los recursos. Según la proyección demográfica, la población total y su distribución entre la cabecera y la zona rural ha experimentado un crecimiento constante[19].

[16] DANE, 2016.
[17] Pholsena, 2018. Sangha et al., 2019.
[18] Emquilichao, 2021.
[19] DANE, 2023.

Figura 1. Ubicación Cuenca del río Quilichao, Cauca, Colombia



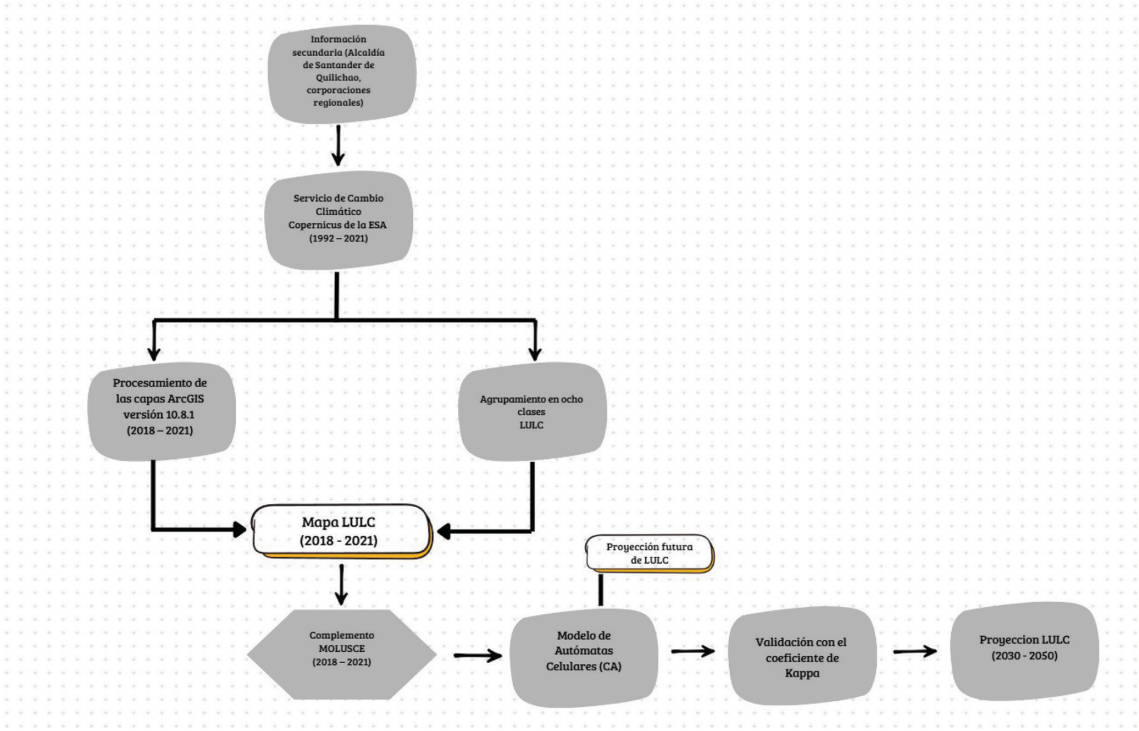
Fuente: Elaboración propia.

Materiales y métodos

Para cumplir los objetivos de esta investigación, se recopiló información secundaria proporcionada por entidades públicas como la Alcaldía de Santander de Quilichao (Cauca) y por corporaciones regionales. Esta información incluyó mapas base topográficos y datos sobre coberturas del suelo, utilizando como insumo para el análisis espacial del área de estudio. En la (Figura 2) se muestra el esquema general que resume las etapas desarrolladas a lo largo del estudio.

Una vez obtenida la información base de la cuenca, se adquirieron los datos de del Servicio de Cambio

Figura 2. Diagrama metodológico



Fuente: Elaboración propia.

Climático Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA CCCS). Este conjunto de datos global presentaba un largo registro de series temporales anuales consistentes desde 1992 hasta 2021 con una resolución espacial de 10 m y 37 clases de cobertura terrestre, de acuerdo con el esquema de clasificación de cobertura terrestre de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO)[20]. Esta información fue procesada por medio del software ArcGIS versión 10.8. 1 en él se compararon las capas para el periodo de tiempo 2018-2021. Establecidas las coberturas, se diseñó una serie de mapas que mostraron la distribución espacial de las coberturas del suelo en diferentes momentos temporales, y se han identificado los patrones y las tendencias a lo largo del periodo estudiado. Con el objetivo de optimizar la clasificación del uso del suelo se agruparon en ocho clases; cuerpos de agua, vegetación densa, pastos escasos, agricultura inundada, cultivos, arbustos, áreas urbanas y suelos desnudos (Tabla 1).

Entre tanto, para modelar la transición y estimar los cambios espacio-temporales del período de tiempo presente (2018-2021) y futuro (2030 y 2050), se utilizó el complemento MOLUSCE (*Modules for Land Use Change Evaluation*). Este interfaz ofrecía varias funcionalidades, incluida la generación de una matriz de probabilidad de transición utilizando el enfoque del modelo de autómatas celulares y redes neuronales artificiales (CA-ANN), así como el modelado basado en simulación utilizando diversas técnicas, como la regresión logística (LR), la evaluación multicriterio (MCE), las redes neuronales artificiales (ANN) y los pesos de evidencia (WoE).

En la última etapa de la simulación, se empleó el modelo de autómatas celulares (CA) para estimar y proyectar los patrones futuros de cobertura LULC[21]. Este modelo permite integrar tanto los aspectos estáticos como dinámicos de los cambios en el uso y cobertura del suelo, lo que contribuye a mejorar la precisión de las predicciones. El enfoque ascendente que caracteriza al modelo CA facilita la representación realista de la expansión urbana y de la dinámica asociada a los cambios en el territorio. La expresión matemática correspondiente a este modelo se presenta en la (Ecuación 1).

$$S(t, t+1) = f(S(t), N) \quad (1)$$

Donde *S(t+1)* representa el estado del sistema en el intervalo de tiempo *(t, t + 1)*, determinado por la probabilidad de transición en función del estado actual S(t) y de cualquier momento (N).

Adicionalmente, se utilizó el coeficiente de Kappa (K) Kappa (K) (Ecuación 2) como medida de validación para evaluar la precisión del modelo de simulación.

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} = 1 - \frac{1 - P_o}{1 - P_{oe}} \quad (2)$$

Donde, K = Coeficiente estadístico de kappa, P_e es la proporción de acuerdos esperados, y P_o es la proporción de acuerdos reales.

Este estadístico evalúa la concordancia entre el mapa simulado y el mapa de referencia, teniendo en cuenta no

Tabla 1. Leyenda de las Coberturas CORINE LAND COVER: Clases y descripción de LULC

CLASE	CLASE DE USO	DESCRIPCIÓN
1	Cuerpos de agua	Ríos, estanques, lagos, océanos, salinas inundadas.
2	Vegetación densa	Plantaciones, bosques latifoliados, bosques de coníferas.
3	Pastos escasos	Prados y campos naturales con escasa o nula cubierta arbórea, sabana abierta
4	Agricultura inundada	Manglares inundados, vegetación emergente, arrozales y otras actividades agrícolas inundadas y con mucho riego.
5	Cultivos	Cereales, pastos y cultivos plantados/arbustos
6	Arbustos	Mezcla de pequeños grupos de plantas o plantas individuales dispersas en un paisaje
7	Áreas Urbanas	Estructuras hechas por el hombre; principales redes de carreteras y ferrocarriles; grandes superficies homogéneas e impermeables
8	Suelo desnudo	Áreas de roca o suelo con muy escasa o nula vegetación durante todo el año

Fuente: Elaboración propia a partir de Karra et al., 2021.

[20] Munthali et al, 2019.

[21] Baghel et al, 2024.

solo las coincidencias observadas al azar, sino también la ubicación específica de los cambios. Es ampliamente empleado en estudios de clasificación de imágenes y simulación espacial, ya que permite tabular una matriz de errores que valida los resultados del modelo[22]. En el contexto del complemento MOLUSCE, se aplicaron tres variantes del coeficiente Kappa para realizar una evaluación más robusta de la capacidad predictiva del modelo; Kappa global (K total): evalúa el grado general de concordancia entre el mapa simulado y el observado, considerando todos los píxeles. Kappa histórico (K histo): pondera la concordancia según los cambios persistentes o históricos, permitiendo valorar la capacidad del modelo para replicar patrones de cambio observados en el pasado. Kappa local (K loc): analiza la concordancia a nivel espacial, comparando celda por celda los mapas generados, lo cual permite detectar posibles sesgos en la ubicación de los cambios simulados.

Estos tres índices se complementan con el cálculo de la exactitud general (overall accuracy) para proporcionar una validación más completa y rigurosa del modelo. El criterio interpretativo para el coeficiente Kappa se presenta en la (Tabla 2).

Resultados y discusión

Matriz de cambio territorial de cobertura y usos del suelo

Los mapas evidenciaron los cambios en el uso del suelo en la cuenca del río Quilichao, proporcionando una visión clara de las transformaciones ocurridas durante el periodo analizado (Figura 3).

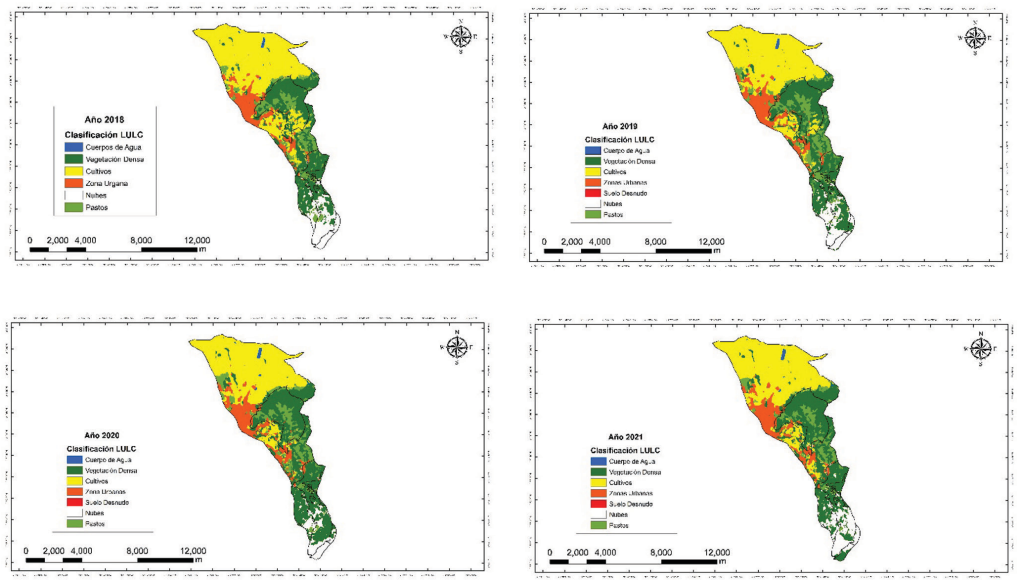
Entre los años 2018 y 2021 se identificó cambios en estas categorías: cuerpos de agua, vegetación densa,

Tabla 2. Criterios de clasificación de K

CLASIFICACIÓN	COEFICIENTE KAPPA	CRITERIO
1	0,00	Pobre (*Poor*)
2	0,01-0,20	Leve (*Slight*)
3	0,21-0,40	Aceptable (*Fair*)
4	0,41-0,60	Moderada (*Moderate*)
5	0,61-0,80	Considerable (*Substantial*)
6	0,81-1,00	Casi perfecto (*Almost perfect*)

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Comparación secuencial del LULC, cuenca río Quilichao, Cauca desde 2018 al 2021



Fuente: Elaboración propia.

[22] Ordoñez; Silva, 2023.

cultivos, construcciones, arbustos, suelos desnudos y pastos escasos. Los cuerpos de agua entre los años (2018 y 2019) aumentaron en 2,07 ha, lo cual representa al 10,24 %. Para los años siguientes, de acuerdo con el periodo (2019-2020), el aumento fue de 4,35 ha con un porcentaje de 19,52 %. No obstante, en el último año del periodo de estudio (2020-2021), se evidenció una disminución de 1,53 hectáreas, correspondiente a una reducción del 5,74 %, lo que indica una pérdida en esta cobertura. Entre tanto, la vegetación densa para el periodo de estudio presento 703,49 ha lo cual corresponde 41,06 % este valor es acumulado, sin embargo, es importante destacar que para los años 2020-2021 se ha presentado una disminución 68,19 ha lo cual corresponde al 2,90 %.

Esto nos permite demostrar que el área de estudio se encuentra en proceso de transición, en el cual el uso del suelo correspondiente a vegetación densa estaría siendo reemplazado por cultivos, considerando que este último ha presentado un aumento de 1.496,12 hectáreas (Tabla 3). Estos cambios en el uso del suelo pueden estar asociados al crecimiento poblacional y las actividades antropogénicas, generando una rápida degradación, perdida de equilibrio ecológico y disminuyendo la biodiversidad. Como consecuencia, se han producido impactos en el clima, así como en las comunidades urbanas y rurales. De otro modo, es posible que este incremento en el uso del suelo para cultivos esté asociado al crecimiento poblacional en el municipio de Santander, el cual ha superado los 100.000 habitantes. Es fundamental que las iniciativas se orienten a reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos frente a los efectos actuales y futuros debido al cambio climático, tal como lo señala el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible[23].

Tabla 3. Comparación de áreas secuenciales la cuenca río Quilichao, Cauca

CLASIFICACIÓN	2018 (HA)	2019 (HA)	2020 (HA)	2021 (HA)
Cuerpos de agua	20,21	22,28	26,63	25,10
Vegetación densa	1.712,97	1.804,38	2.348,27	2.416,46
Pastos escasos	2.677,54	2.467,85	607,72	590,80
Agricultura inundada	544,77	0	0	0
Cultivos	511	1.804,38	2.097,93	2.007,12
Arbustos	579,97	436,11	340,20	527,78
Construcciones	0	574,45	624,84	478,31
Suelo desnudo	0	0,55	0	0

Fuente: Elaboración propia.

[23] MADS, 2017.

Por otra parte, las áreas construidas entre los años 2018 y 2019 mostraron un aumento del 8,77 %, esto refleja una tensión creciente en la expansión urbana en la cuenca, sin embargo, entre los años 2019 y 2020 se identificó un cambio en esta dinámica, con una reducción del 23,45 % posiblemente atribuible a la conversión de estas áreas en tierras agrícolas[24]. Este comportamiento respalda el carácter predominante rural de la cuenca, como se muestra en el estudio[25]. Las áreas urbanas e industriales, junto con las superficies de agua, representaron menos del 3 % del total, lo cual confirma dicha tendencia.

En cuanto a la cobertura de arbustivas entre los años 2018 y 2019 se evidenció una disminución de 143,86 hectáreas lo que represento 24,80 %. Esta tendencia continuó en el año 2020, con una reducción adicional de 95,91 ha (21,99 %). No obstante, durante el último periodo analizado (2020-2021), se registró un cambio en esta tendencia, con un aumento del 55,13 %. Es posible que este resultado sea el esfuerzo de reforestación o del rebrote natural del bosque. Los cambios en las coberturas del uso del suelo en esta investigación son coherentes con los estudios previos, que también documentaron una disminución de la vegetación densa y un aumento de las áreas agrícolas[26].

De acuerdo con estos resultados, la planificación ambiental como estrategia clave para conservar la diversidad biológica, mantener la conectividad del paisaje, estabilización el suelo y asegurar los servicios ecosistémicos. Investigaciones realizadas[27], respaldan esta afirmación, al señalar que la falta de una planificación adecuada orientada hacia la sostenibilidad puede generar impactos negativos en los medios de subsistencia de las comunidades rurales y urbanas. En el contexto de Colombia, estas implicaciones adquieren particular relevancia debido a las características geográficas, ecológicas y socioeconómicas del territorio. En este sentido, se hace necesario implementar medidas adaptativas frente al cambio climático, tal como lo estableció el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC)[28].

El análisis de la variación en los cambios de uso del suelo, especialmente en áreas de vegetación densa, es crucial debido a las potenciales consecuencias negativas

[24] Mfwango et al., 2022. Mwanga et al., 2024.
[25] Anthony et al., 2024.
[26] Gazi; Mondal, 2018. Kumar; Mondal; Pahm, 2021. Firozjaei et al., 2021. Baghel et al., 2024.
[27] Schmera; Boschi, Baur, 2023. Prodanovic; Bach; Stojkovic, 2024.
[28] DNP, 2012.

para la biodiversidad, el clima y las comunidades locales que puede acarrear la alteración de la cobertura boscosa en las reservas naturales. Esto subraya la importancia de conservar y gestionar de manera sostenible estos ecosistemas. En el contexto colombiano, la resiliencia socio-ecológica es esencial. Se requieren medidas adaptativas para reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos frente a los efectos actuales o previstos del cambio climático, tal como lo señala[29].

Como parte de los resultados obtenidos en esta investigación para el periodo de estudio 2018-2021, se cuantifico una matriz de transición que presento la cantidad relativa de pixeles que cambian de una clasificación a otra (Tabla 4).

Los resultados obtenidos mediante la matriz de transición para el periodo de estudio 2018-2021 presentaron tendencias de cambio de uso del suelo similares con procesos de transformación territorial identificadas en distintas investigaciones dentro de un contextos rurales y periurbanos. Se identificó una baja transición en los usos del suelo como pastos escasos (90,2 %), arbustos (73,7 %) y construcciones (64,8 %), mientras que la vegetación densa evidenció una alta inestabilidad, con una probabilidad de permanencia de apenas 1,6 %, siendo reemplazada principalmente por arbustos (67,9 %) y cultivos (23,9 %). Este comportamiento demostró un proceso de degradación progresiva de la cobertura natural, posiblemente relacionado con factores antrópicos como la expansión agropecuaria, la sustitución de cultivos y la urbanización informal transformando el territorio de un nivel altamente rural a urbano. Si bien el área de estudio conserva una predominancia rural, los procesos de urbanización incipiente podrían estar consolidando una transición hacia formas de ocupación más densas y permanentes. Este comportamiento demuestra la necesidad de prestar atención a la planificación del crecimiento urbano y la protección de suelos agrícolas frente a un avance desorganizado del uso del suelo construido.

Al comparar los resultados de este estudio con investigaciones internacionales desarrollados por algunos autores[30], se identificaron similitudes en las dinámicas de transición del uso del suelo, en estos estudios, las categorías de bosques y cuerpos de agua presentaron una disminución en su estabilidad, no obstante, las áreas verdes y los terrenos áridos contribuyeron de manera considerable a la expansión de áreas construidas. Estas tendencias fueron comparables con lo identificadas en este estudio, donde los cultivos mostraron una baja permanencia (15,6 %) y aportaron en un 64,8 % al crecimiento de las áreas construidas, lo que reflejando un fenómeno análogo de transformación antrópica del suelo.

De otro modo, el uso de herramientas como el plugin MOLUSCE y de modelos de predicción espacial como CA–ANN, han demostrado una alta capacidad para representar con precisión escenarios de cambio territorial. Su implementación resulta valiosa en contextos donde el ordenamiento territorial es débil y la presión sobre los recursos naturales se incrementa. En este sentido, dichas herramientas pueden contribuir tanto a la planificación ambiental como a la identificación temprana de zonas crítica aporta elementos importantes para comprender dichas dinámicas en un contexto rural del suroccidente colombiano, y subraya la necesidad urgente de diseñar e implementar estrategias de manejo territorial integradas que permitan anticipar y mitigar los impactos socioecológicos derivados del cambio de uso del suelo[31].

Durante el período de validación, los valores obtenidos para los indicadores de precisión fueron:

Tabla 4. Matriz de transición 2018-2021

CLASE	CUERPO DE AGUA	VEGETACIÓN DENSA	PASTOS ESCASOS	CULTIVOS	ARBUSTOS	CONSTRUCCIONES
Cuerpos de agua	0,804611	0,014147	0,094664	0,016042	0,004652	0,002072
Vegetación densa	0,000001	0,016175	0,005972	0,239309	0,679702	0,058915
Pastos escasos	0,000049	0,035576	0,902027	0,043458	0,00933	0,009379
Cultivos	0,000016	0,156648	0,011059	0,156648	0,028519	0,648038
Arbustos	0	0,003851	0,005526	0,246561	0,736831	0,007231
Construcciones	0,000016	0,156648	0,011059	0,156648	0,028519	0,648038

Fuente: Elaboración propia.

[29] MADS, 2017.

[30] Baghel et al., 2024.
[31] Baghel et al., 2024.

porcentaje de corrección (0,987), Kappa global (K overall: 0,981), Kappa histórico (K histo: 0,986) y Kappa local (K loc: 0,986), (Tabla 5). Estos resultados superan el umbral de aceptación que corresponde al 90 % resaltando alta precisión y confiabilidad del modelo empleado en el análisis de coberturas (LULC) y son consistentes con estudios previos sobre validación espacial en modelación de coberturas[32].

Comparando los resultados obtenidos en este estudio con el trabajo realizado[33], quienes alcanzaron un valor de 0,83 al aplicar un modelo CA-ANN en un contexto similar, se puede asegurar que el modelo predictivo tiene un mejor comportamiento. Asimismo, otros investigadores identificaron niveles de precisión semejantes al clasificar coberturas[34]. En general, estos resultados respaldaron la idoneidad del modelo aplicado en esta investigación para la predicción confiable de los cambios en el uso y cobertura del suelo.

En relación con las proyecciones mostraron porcentaje de cambio (aumento y disminución) comparables a los observados en la investigación[35]. La validación gráfica del modelo se realizó mediante la comparación del mapa LULC previsto para 2020 con el mapa observado de ese mismo año, lo cual se ilustra en la (Figura 4).

Ante estos resultados de predicción para el año 2030 (Tabla 6) es importante tener en cuenta que la hoja de ruta presentada por Colombia se distinguió por su ambiciosa meta de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales son responsables del calentamiento global.

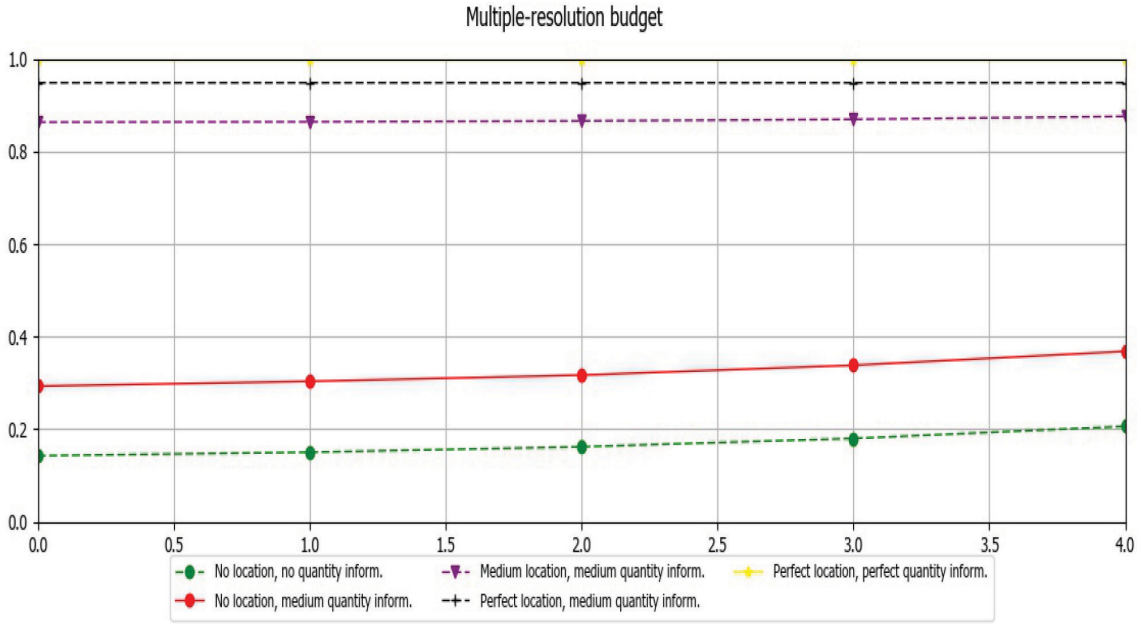
Según lo anunciado por el gobierno, el país se ha comprometido a reducir sus emisiones en un 51 %

Tabla 5. Coeficiente Kappa para LULC al 2050

INDICADORES	PREDICTOR
% de correción	0,987
K Overall	0,981
K Histo	0,986
K Loc	0,994

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Validación de LULC observado (2020) y LULC simulado (2020)



Fuente: Elaboración propia.

[32] Alam et al., 2021. Kamaraj; Rangarajan, 2022.
[33] Uddin et al., 2023.
[34] Mfwango et al., 2022. Santhosh; Shilpa, 2023. Baghel et al., 2024.
[35] Abijith; Saravanan, 2022.

Tabla 6. Comparación de áreas secuenciales de cuenca río Quilichao, Cauca desde 2019 al 2050

CLASIFICACIÓN	2018(HA)	2019(HA)	2020(HA)	2021(HA)	2030(HA)	2050(HA)
Cuerpos de agua	20,21	22,28	26,63	25,10	26,63	25,00
Vegetación densa	1.712,97	2.467,85	2.348,27	2.416,46	2.115,76	1.979,20
Pastos escasos	2.677,54	574,45	607,72	590,8	604,87	580,87
Cultivos	511,00	1.804,38	2.097,93	2.007,12	2.347,33	2.442,54
Arbustos	579,97	436,11	340,2	527,78	328,47	558,38
Construcciones	0,00	740,84	624,84	478,31	622,53	459,99

Fuente: Elaboración propia.

para el año 2030. De esta manera, Colombia emitirá un máximo de 169,4 millones de toneladas de dióxido de carbono para dicho año. En su primera Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) presentada en 2015, Colombia había comprometido únicamente una reducción del 20 % en sus emisiones para el mismo período[36]. La pérdida de cobertura de vegetación densa, arbustos y la expansión de la agricultura en zonas de importancia ambiental impactaría notablemente la meta climática para el año citado. Por ello es importante detener la deforestación lo antes posible para alcanzar una adaptabilidad climática para el año 2050.

Cada año que persiste este problema tiene consecuencias muy graves en la estabilidad territorial de las áreas afectadas y del país en su conjunto. Los ecosistemas naturales son invaluables y brindan una amplia gama de servicios vitales para el bienestar humano. La predicción también muestro al mismo periodo de tiempo (2021-2030). Los cultivos incrementaron 330,21 ha y para el (2021-2050) 435,42 ha respectivamente.

La cuenca del río Quilichao hace es parte de la zona de vida bosque húmedo Premontano presente en el territorio de la reserva natural Munchique, y es de especial atención por ser el último relicto de bosque del norte del departamento del Cauca. Los resultados demostrar que existe un conflicto por el uso del suelo que presenta la cuenca, e implican la ausencia de un marco de conservación que en escenarios futuros representará la perdida de las dinámicas ecológicas ocasionando un desequilibrio en los bienes y servicios ecosistémicos[37].

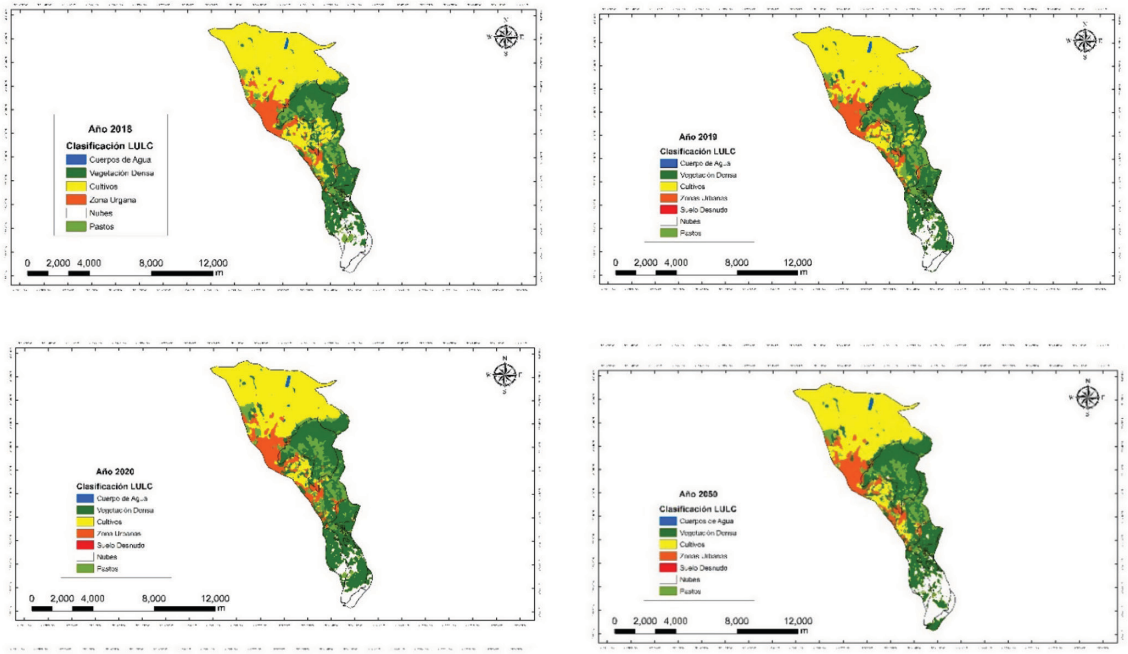
Por otro lado, esta investigación es pionera en el departamento del Cauca, la zonificación y cartografía obtenida, se convierte en una caja de herramientas para los tomadores de decisión, lo cual implica aterrizar los marcos legales que garanticen el cumplimiento de la norma en zonas de reserva natural. El uso de las metodologías descritas se convierte en una base para iniciar protocolos que permitan zonificar las áreas de importancia ambiental, estudiando y analizando sus cambios para propones estrategias de conservación y adaptación al cambio climático, en este escenario dada la importancia que representa la cuenca del río Quilichao en la región al ser el municipio de Santander de Quilichao, el poblado más importante del departamento después de la capital Popayán. Por lo tanto, de acuerdo con la predicción del LULC para los años 2030 y 2050; es necesario tomar medidas correctivas de manera urgente para potenciar los ecosistemas presentes y poder lograr mediante estrategias de reducción desde el enfoque de resiliencia socioecológica (Figura 5).

Implementar medidas participativas para recuperar y restaurar las áreas de protección, siguiendo las regulaciones establecidas, es una estrategia fundamental para mejorar la conectividad entre los fragmentos de bosque y conservar tanto los caudales hídricos como su calidad. Esta iniciativa se centraría en la zona media de la cuenca, desde la vereda Cambalache hasta la parte alta ubicada en las veredas Guayabal y Pavitas. La vegetación en las áreas de protección forestal tiene el potencial de retener sedimentos y productos químicos derivados del uso del suelo en actividades agropecuarias, lo que, a su vez, mejora la calidad del agua. Estas acciones se llevarían a cabo de manera colaborativa y participativa para garantizar un enfoque integral y sostenible en la conservación del entorno[38].

De otro modo la preservación de las áreas boscosas existentes en las fuentes de agua que alimentan el río Quilichao mediante su aislamiento ecológico, el cual consiste en actividades como la delimitación, restricción de acceso y protección activa frente a actividades humanas que generan fragmentación o degradación, tiendo como propósito reducir la presión antrópica sobre los ecosistemas ribereños y promover

[36] MADS, 2022.
[37] Basto-Monsalve; Pascuas-Rengifo; Fontalvo-Buelvas, 2023.
[38] Arias-Arévalo; Pacheco-Valdés, 2022.

Figura 5. Comparación secuencial cuenca río Quilichao, Cauca desde 2018 al 2021, predicción 2030 y 2050



Fuente: Elaboración propia.

su regeneración natural. Este aislamiento puede incluir la instalación de cercas vivas, la reforestación de bordes degradados y la implementación de zonas de amortiguamiento que impidan el ingreso de ganado, cultivos o construcciones. Esta medida contribuiría a la conservación y al aumento de la biodiversidad tanto en los ecosistemas terrestres como acuáticos. Esto reviste un alto grado de importancia ambiental como se menciona en la investigación desarrollada[39]. Las regiones de los Andes tropicales se destacan como áreas prioritarias a nivel mundial debido a la extraordinaria diversidad biológica y a la presencia de especies endémicas.

Finalmente, la presencia del Macizo Colombiano expone lo imperativo de la gestión integrada del recurso hídrico que esta zona del país, la cual debe estar acompañada de investigaciones que permitan articular planes de gestión desde las reservas naturales, ecosistemas en los cuales emergen los sistemas hídricos. El abastecimiento de agua para consumo humano proviene de las cuencas de los ríos que nacen en esta área de importancia ambiental y que surte a gran parte del departamento. Ante este escenario, se hace necesario diseñar los lineamientos que permitan garantizar la sostenibilidad de los bienes y servicios ambientales que garanticen el recurso hídrico disponible, ya que de ello depende los cambios territoriales[40].

Conclusiones

La evaluación de los cambios en la cobertura y uso del suelo (LULC), así como la predicción de sus transformaciones futuras, constituye una herramienta esencial para el seguimiento de los recursos naturales y la planificación ambiental de una cuenca hidrográfica. En este estudio se analizó la dinámica del LULC y se proyectó su comportamiento futuro en la cuenca del río Quilichao, con especial atención a las trayectorias de transformación entre 2019 y 2050. Los resultados revelan una disminución de 488,65 hectáreas de vegetación densa en dicho periodo, acompañada de un aumento de 638,16 hectáreas en cultivos, lo cual evidencia una tendencia sostenida hacia la conversión de coberturas naturales en usos agropecuarios.

La validación del modelo mostró una alta precisión predictiva, respaldada por coeficientes Kappa de 0,99 y 0,98 para los años 2020 y 2021, así como un Kappa global de hasta 0,99, lo que supera ampliamente los estándares de aceptación establecidos en modelación espacial. Esta precisión se explica por la incorporación de algoritmos robustos como CA–ANN (Autómatas Celulares – Redes Neuronales Artificiales), junto con el uso del plugin MOLUSCE, que permite integrar variables espaciales importantes como la distancia a vías, cuerpos de agua, pendientes y expansión construida, podría mejorando sustancialmente la capacidad del modelo para capturar patrones complejos de cambio

[39] Drenkhan; Castro-Salvador, 2023.
[40] Tagliari et al., 2023. Da Silva; Filho, 2025.

territorial. Este nivel de detalle metodológico ha permitido representar de manera confiable las trayectorias de cambio y proyectar escenarios futuros con alto grado de confianza.

Las predicciones de LULC para los años 2030 y 2050 indican una continuación de las tendencias observadas, con un incremento en cultivos de 330,21 ha entre 2021 y 2030, y de 435,42 ha entre 2021 y 2050, asociado al aumento de la actividad antropogénica. Este crecimiento plantea un riesgo significativo de conflictos por uso del suelo, especialmente en zonas de expansión urbana y áreas de protección ambiental.

Finalmente, este estudio constituye una herramienta valiosa para los procesos de ordenamiento territorial y formulación de políticas públicas ambientales. ya que, aporta una línea base cuantitativa para el diseño de estrategias de gestión sostenible de la cuenca del río Quilichao en consonancia con los compromisos climáticos de Colombia para 2030 y 2050, y ofrecen una herramienta replicable para el monitoreo y proyección de cambios en otros territorios rurales del país.

Financiación

Los autores agradecen al doctorado Interinstitucional en Ciencias Ambientales adscrito a la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle, Cali-Colombia, Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano OSSO, adscrito al Departamento de Geografía de la Universidad del Valle, las Autoridades Indígenas del Territorio Ancestral de Munchique Los Tigres- kwekwe nejwesx, Santander de Quilichao, Cauca Colombia. Finalmente, los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigaciones para apoyar económico mediante la convocatoria formación de Doctorados # 149 de 2023, de la Universidad del Valle Cali Colombia.

Contribución de los autores

Conceptualización: David Alejandro Muñoz, Yesid Carvajal-Escobar y Elkin de Jesús Salcedo Hurtado.
Metodología: David Alejandro Muñoz.
Análisis formal: David Alejandro Muñoz.
Investigación: David Alejandro Muñoz, Yesid Carvajal-Escobar y Elkin de Jesús Salcedo.
Preparación del borrador original: David Alejandro Muñoz.
Revisión y edición: David Alejandro Muñoz, Yesid Carvajal-Escobar y Elkin de Jesús Salcedo.
Visualización: David Alejandro Muñoz, Yesid Carvajal-Escobar y Elkin de Jesús Salcedo.
Supervisión: Elkin de Jesús Salcedo y Yesid Carvajal-Escobar.
Todos los autores han leído y aceptado la versión final del manuscrito.

Referencias

Abijith, Devanantham; Saravanan, Subbarayan. 2022: Assessment of land use and land cover change detection and prediction using remote sensing and CA Markov in the northern coastal districts of Tamil Nadu, India. *Environ Sci Pollut Res,* 29, 86055-86067. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15782-6

Alam, Nasibul; Saha, Swati; Gupta, Srimanta; Chakraborty, Subha. 2021: Prediction modelling of riverine landscape dynamics in the context of sustainable management of floodplain: a geospatial approach. *Annals of GIS,* 27(3), 299-314. https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1870558

Anand, Vicky; Oinam, Bakimchandra. 2020: Future land use land cover prediction with special emphasis on urbanization and wetlands. *Remote Sens Lett,* 11(3), 225–234. https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1704304

Anthony, Tobore; Shohan, Ahmed Ali A; Oludare, Adedeji; Alsulamy, Saleh; Al Kafy, Abdulla; Khedher, Khaled Mohamed. 2024: Spatial analysis of land cover changes for detecting environmental degradation and promoting sustainability. *Kuwait Journal of Science*, 51(2), 100197. https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100197

Arias-Arévalo, Paola; Pacheco-Valdés, Nicol. 2022: Implementación de pagos por servicios ambientales en la Cuenca del río Cali, Colombia: una mirada desde los sistemas socioecológicos. *Revista de Economia e Sociologia Rural,* 61(2), e256251. https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.256251

Arsanjani, Jamal Jokar; Kainz, Wolfgang; Mousivand, Alireza J. 2011: Tracking dynamic land-use change using spatially explicit Markov chain based on cellular automata: the case of Tehran. *International Journal of Image and Data Fusion,* 2(4), 329-345. https://doi.org/10.1080/19479832.2011.605397

Baghel, Shreeya; Kothari, Mukesh Kumar; Tripathi, Manish Prasad; Singh, Pradeep Kumar; Bhakar, Sita Ram; Dave, Vikramaditya; Jain, Shailendra Kumar. 2024: Spatiotemporal LULC change detection and future prediction for the Mand catchment using MOLUSCE tool. *Environmental Earth Sciences,* 83(2), 1-15. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11381-5

Basto-Monsalve, Mary Brigén; Pascuas-Rengifo, Edwar; Fontalvo-Buelvas, Juan Camilo. 2023: Evaluación de la resiliencia ecosis-

témica del área protegida Parque Nacional Natural Alto Fragua Indi Wasi en Caquetá, Colombia. *Revista Científica del Amazonas*, 6(12), 5-18. https://doi.org/10.34069/RA/2023.12.01

Chen, Yu; Li, Xia; Liu, Xia; Ai, Bo; Li, Sheng. 2016: Capturing the varying effects of driving forces over time for the simulation of urban growth by using survival analysis and cellular automata. *Landscape and Urban Planning,* 152, 59-71. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.03.011

DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2016: *Proyecciones demográficas para el municipio de Santander de Quilichao.* Bogotá (Colombia), DANE. https://www.dane.gov.co

DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística). 2023: *Proyecciones de población municipal por área (urbana y rural) 2018-2035.* Bogotá (Colombia), DANE. https://www.dane.gov.co

Da Silva, C. M.; Filho, J. P. 2025: Variaciones en el uso y cobertura del suelo en una región del Cerrado brasileño: un estudio de caso de la cuenca del río Farinha, MA y el Parque Nacional Chapada das Mesas. *Agua y Territorio / Water and Landscape*, 25, 409-420. https://doi.org/10.17561/at.25.8285

DNP (Departamento Nacional de Planeación). 2012: *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático* (PNACC). Bogotá, (Colombia), IDEAM, DNP, MADS, UNGRD. https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico/

Drenkhan, Fabian; Castro-Salvador, Sofía. 2023: Una aproximación hacia la seguridad hídrica en los Andes tropicales: desafíos y perspectivas. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, 12, A006. https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202302.A006

EMQUILICHAO (Empresa de Servicios Públicos de Santander de Quilichao). 2021: *Acueductos rurales del municipio de Santander de Quilichao*. Santander de Quilichao (Colombia), Empresa de Servicios Públicos de Santander de Quilichao.

Firozjaei, Mohammad Karimi; Sedighi, Amir; Firozjaei, Hamzeh Karimi; Kiavarz, Majid; Homaee, Mehdi; Arsanjani, Jamal Jokar; Makki, Mohsen; Naimi, Babak; Alavipanah, Seyed Kazem. 2021: A historical and future impact assessment of mining activities on surface biophysical characteristics change: a remote sensing-based approach. *Ecological Indicators*, 122, 107264. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107264

Gazi, Amir Ali; Mondal, Ismail. 2018: Urban Heat Island and its effect on dweller of Kolkata Metropolitan area using geospatial techniques. *International Journal of Computer Sciences and Engineering,* 6(10), 778-794. https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i10.741753

Hamad, Rahel; Balzter, Heiko; Kolo, Kamal. 2018: Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability,* 10(10), 3421. https://doi.org/10.3390/su10103421

Hamad, Rahel; Kolo, Kamal; Balzter, Heiko. 2018: Land cover changes induced by demining operations in Halgurd-Sakran National Park in the Kurdistan Region of Iraq. *Sustainability*, 10(7), 2442. https://doi.org/10.3390/su10072422

Hu, Zhan; Lo, Chi P. 2007: Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. Computers. *Environment and Urban Systems*, 31(6), 667-688. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2006.11.001

Kafy, Abdulla Al; Faisal, Abdullah Al; Sikdar, Soumik; Hasan, Mohammad Mohnudul; Rahman, Mahbubur; Hasan Khan, Mohammad Hasib; Islam, Rahatul. 2019: Impact of LULC changes on LST in Rajshahi district of Bangladesh: a remote sensing approach. *Journal of Geographical Studies*, 3(1),11-23. https://doi.org/10.21523/gcj5.19030102

Kamaraj, Manikandan; Rangarajan, Sathyanathan. 2022: Predicting the future land use and land cover changes for Bhavani basin, Tamil Nadu, India, using QGIS MOLUSCE plugin. *Environ Sci Pollut Res*, 29, 86337-86348. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17904-6

Karra, Krishna; Kontgis, Caitlin; Statman-Weil, Zoe; Mazzariello, Joseph C.; Mathis, Mark; Brumby, Steven P. 2021: Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 4704-4707,https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499

Kumar, Mithun; Mondal, Ismail; Pham, Quoc Bao. 2021: Monitoring Forest landcover changes in the Eastern Sundarban of Bangladesh from 1989 to 2019. *Acta Geophys,* 69, 561-577. https://doi.org/10.1007/s11600-021-00551-3

Li, Xia; Lin, Jun; Chen, Yu; Liu, Xia; Ai, Bo. 2013: Calibrating cellular automata based on landscape metrics by using genetic algorithms. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(3), 594-613. https://doi.org/10.1080/13658816.2012.698391

Li, Xia; Yeh, Anthony Gar-On. 2002: Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science,* 16(4), 323-343. https://doi.org/10.1080/13658810210137004

Liu, Linun; Liang, Youjia; Hashimoto, Shizuka. 2020: Integrated assessment of land-use/ coverage changes and their impacts on ecosystem services in Gansu Province, northwest China: implications for sustainable development goals. *Sustainability Science*, 15, 297-314. https://doi.org/10.1007/s11625-019-00758-w

Majumder, Atin; Das, Susanta; Bora, Sony; Mandal, Agniva. 2023: Monitoring of Natural Resources Using Remote Sensing and GIS Technology Under Changing Climate Scenario, in Pande, Chaitanya, B.; Moharir, Kanak N.; Negm, Abdelazim (Eds.), *Climate change impacts in India*. Cham (Switzerland), *Springer*, 173-188. https://doi.org/10.1007/978-3-031-42056-6_8

MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). 2017: *Política nacional de cambio climático.* https://www.minambien-

te.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/9.-Politica-Nacional-de-Cambio-Climatico.pdf

MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). 2022: *Aprobado un plan que ayudará a obtener las metas climáticas de Colombia*. https://www.minambiente.gov.co/aprobado-un-plan-que-ayudara-a-obtener-las-metas-climaticas-de-colombia

Mfwango, Lusajo Henry; Kisiki, Clarance Paul; Ayenew, Tenalem; Mahoo, Henry F. 2022: The impact of land use/cover change on surface runoff at Kibungo sub-catchment of Upper Ruvu catchment in Tanzania. *Environmental Challenges*, 7, 100466. https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100466

Mulatu, Kassahun; Hundera, Kitesa; Senbeta, Feyera. 2024: Analysis of land use/ land cover changes and landscape fragmentation in the Baro-Akobo Basin, Southwestern Ethiopia. *Heliyon*, 10(7), e28378. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28378

Munthali, Maggie Grace; Davis, Nerhene; Adeola, Abiodun M.; Botai, Joel O.; Kamwi, Jonathan M.; Chisale, Harld L. W.; Orimoogunje, Oluwafemi O. I. 2019: Local perception of drivers of land-use and land-cover change dynamics across Dedza district, Central Malawi region. *Sustainability*, 11(3), 832. https://doi.org/10.3390/su11030832

Mwanga, Eliafie; Shaibu, Abdul Ganiyu; Issaka, Zakaria. 2024: Assessing the impact of land use and land cover (LULC) changes on the surface runoff downstream of an ungauged Bontanga watershed in Northern Ghana. *Water Practice and Technology*, 19(4), 1348-1364. https://doi.org/10.2166/wpt.2024.061

Ordoñez, C. A.; Silva, D. 2023: Land Use/Land Cover (LULC), Change Detection, and Simulation Analysis of Manila Bay's Dolomite Mining Site in Cebu, Philippines Using Sentinel-2 Satellite. *International Journal of Geoinformatics*, 19(5), 87-103. https://doi.org/10.52939/ijg.v19i5.2667

Pholsena, Vatthana. 2018: Mobility, familiarity and prejudice: living together in a multiethnic town in southern Laos. *Ethnic and Racial Studies,* 43(10), 1872-1889. https://doi.org/10.1080/01419870.2018.1546022

Prodanovic, Veljko; Bach, Peter M.; Stojkovic, Milan. 2024: Urban nature-based solutions planning for biodiversity outcomes: human, ecological, and artificial intelligence perspectives. *Urban Ecosyst,* 27, 1795-1806. https://doi.org/10.1007/s11252-024-01558-6

Roy, Parth Sarathi; Ramachandran, Reshma M.; Paul, Oscar; Thakur, Praveen K.; Ravan, Shirish; Dev Behera, Mukunda; Sarangi, Chandan; Kanawade, Vijay P. 2022: Anthropogenic land use and land cover changes - a review on its environmental consequences and climate change. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 50(8), 1615-1640. https://doi.org/10.1007/s12524-022-01569-w

Sangha, Kamaljit K.; Maynard, Simone; Pearson, Jasmine; Dobriyal, Pariva; Badola, Ruchi; Hussain, Syed Ainul. 2019: Recognising the role of local and Indigenous communities in managing natural resources for the greater public benefit: case studies from Asia and Oceania region. *Ecosystem Services* 39, 100991. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100991

Santhosh, Lakkur Gurunarayan; Shilpa, Devanahalli Nagaraj. 2023: Assessment of LULC change dynamics and its relationship with LST and spectral indices in a rural area of Bengaluru district, Karnataka India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment,* 29,100886. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100886

Saputra, Muhammad Heru; Lee, Hwan Soon. 2019: Prediction of land use and land cover changes for North Sumatra, Indonesia, using an artificial-neural-network-based cellular automaton. *Sustainability,* 11(11), 3024. https://doi.org/10.3390/su11113024

Schmera, Dénes; Boschi, Cristina; Baur, Bruno. 2023: The type of forest edge shapes snail assemblages at forest–pasture transitions. *Scientific Reports*, 13(1), 16761. https://doi.org/10.1038/s41598-023-43758-8

Tagliari, Mario M.; Bogoni, Juliano A.; Blanco, Graziela D.; Cruz, Aline P.; Peroni, Nivaldo. 2023: Disrupting a socio-ecological system: could traditional ecological knowledge be the key to preserving the Araucaria Forest in Brazil under climate change? *Climatic Change,* 176(2), 1-20. https://doi.org/10.1007/s10584-022-03477-x

Uddin, Md Shihb; Mahalder, Badal; Mahalder, Debabrate. 2023: Assessment of Land Use Land Cover Changes and Future Predictions Using CA-ANN Simulation for Gazipur City Corporation, Bangladesh. *Sustainability,* 15(16), 12329. https://doi.org/10.3390/su151612329

Verburg, Peter Herman; Van De Steeg, Jan; Veldkamp, Arend; Willemen, Lenny. 2009: From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1327-1335. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.08.005

Yang, Qiong; Li, Xia; Shi, Xia. 2008: Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines. *Computers & Geosciences*, 34(6), 592-602. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.08.003