

Cambios en el uso de la tierra (1997-2023) en la cuenca del río Siquiaries, Alajuela: impactos sobre las áreas de protección

Recibido: 06/08/2025 Aceptado: 13/01/2026

María Álvarez Jiménez¹, José Castro Solís², Pablo Ramírez Granados³

1. Laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, maria.alvarez.jimenez@una.ac.cr

2. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, jose.castro.solis@una.ac.cr

3. Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, pablo.ramirez.granados@una.ac.cr

RESUMEN: Este estudio analiza los cambios en el uso de la tierra en la microcuenca del río Siquiaries (Alajuela, Costa Rica) durante el periodo 1997-2023, con especial atención a las áreas de protección hídrica. La región ha sido objeto de una intensa transformación del paisaje, impulsada por el crecimiento urbano e industrial, afectando directamente la funcionalidad ecológica de los ecosistemas ribereños. A través de uso de sistemas de información geográfica y trabajo de campo, se identificaron las áreas de protección en torno a ríos, quebradas, pozos y nacientes, considerando la normativa nacional vigente. Se realizó un análisis comparativo de los usos del tierra entre 1997 y 2023, evidenciando una reducción del 13% en pastos y cultivos, y un aumento significativo en infraestructura (de 4.9% a 24.3%) y cobertura forestal (de 10% a 12.6%). Se detectaron conflictos de uso en las zonas de protección, como la presencia de infraestructura (14.18%) y pastos (36.74%), que comprometen los servicios ecosistémicos asociados a la calidad y disponibilidad del recurso hídrico. Estos hallazgos destacan la necesidad de estrategias integradas de gestión territorial, restauración ecológica y aplicación efectiva de políticas como la Política Nacional de Áreas de Protección (2020-2040). Se requiere fortalecer la gobernanza, implementar soluciones basadas en la naturaleza y priorizar acciones de conservación y rehabilitación de las zonas ribereñas para asegurar la sostenibilidad hídrica y mitigar los impactos del cambio de uso de la tierra en la microcuenca. Palabras clave: Áreas de protección, agua, cuenca, uso de la tierra.

ABSTRACT: This study analyzes land use changes in the Siquiaries River micro-watershed (Alajuela, Costa Rica) during the period 1997-2023, with special attention to water protection areas. The region has been subject to intense landscape transformation, driven by urban and industrial growth, directly affecting the ecological functionality of riparian ecosystems. Through cartography, satellite images and field work, the protection areas around rivers, streams, wells and springs were identified and characterized, taking into account current national regulations. A comparative analysis of land use between 1997 and 2023 showed a 13% reduction in pastures and crops, and a significant increase in infrastructure (from 4.9% to 24.3%) and forest cover (from 10% to 12.6%). Use conflicts were detected in the protection zones, such as the presence of infrastructure (14.18%) and pastures (36.74%), which compromise the ecosystem services associated with the quality and availability of water resources. These findings highlight the need for integrated territorial management strategies, ecological restoration and effective implementation of policies such as the National Policy for Protected Areas (2020-2040). The study recommends strengthening governance, implementing nature-based solutions, and prioritizing conservation and rehabilitation actions in riparian zones to ensure water sustainability and mitigate the impacts of land use change in the watershed.

Key words: Protection areas, water, basin, land use.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Tárcoles, conformada por tres subcuencas principales (río Virilla, río Grande y río Grande de Tárcoles), alberga aproximadamente 253 microcuencas, entre las cuales se encuentra la del río Siquiares. Esta zona ha experimentado transformaciones significativas en el uso del suelo debido al crecimiento urbano acelerado y la intensificación de actividades productivas, generando impactos negativos sobre las áreas de protección hídrica (Hernández, 2010). En las regiones tropicales, la creciente presión antropogénica ha intensificado los procesos de cambio de uso de la tierra, resultando en la degradación de la calidad del agua, contaminación de cuerpos hídricos, erosión edáfica y pérdida progresiva de biodiversidad y cobertura forestal (Hernández et al., 2013). Estos procesos incrementan la vulnerabilidad ecosistémica de las cuencas hidrográficas, comprometiendo su funcionalidad y servicios ambientales.

Las áreas de protección hídrica constituyen componentes esenciales en la gestión integral de cuencas hidrográficas, desempeñando un papel fundamental en la conservación de los recursos hídricos al garantizar tanto la cantidad como la calidad del suministro de agua potable (Dostal, 2007). Su importancia trasciende la provisión hídrica, ya que son vitales para la supervivencia de ecosistemas y el desarrollo de actividades económicas humanas (Vásquez et al., 2023). La integridad de estas zonas, caracterizada por la presencia de cobertura arbórea, resulta crítica dado el papel clave que desempeñan los bosques en la regulación del ciclo hidrológico y la protección edáfica (Rodríguez, 2020). Sin embargo, las áreas de protección enfrentan amenazas por actividades humanas, especialmente la urbanización y los cambios en el uso de la tierra. Estas actividades provocan problemas como la erosión y la contaminación (Mattey et al., 2017). Estas zonas no solo proporcionan servicios ecosistémicos esenciales relacionados con la provisión hídrica, sino que también contribuyen a la belleza escénica, conectividad ecológica y mitigación de impactos en zonas ribereñas adyacentes (Arauz, 2018). Su funcionalidad es primordial para asegurar el suministro hídrico, un servicio ecosistémico indispensable para el bienestar humano (Romero et al., 2014).

Según Díaz y Gaspari (2017), las áreas de protección hidrológica representan zonas de alta relevancia ecológica que actúan como refugios naturales, ejerciendo funciones de retención de sedimentos, nutrientes y contaminantes provenientes de áreas circundantes. Estas características las posicionan como elementos estratégicos para la gestión sostenible de cuencas. En el contexto de la cuenca del río Siquiares, existe una necesidad imperante de analizar los cambios en el uso de la tierra dentro de las áreas de protección hídrica. Actualmente, la ausencia de estudios exhaustivos que caractericen la cobertura vegetal en estas zonas limita la capacidad de implementar estrategias efectivas de recuperación ecosistémica. La investigación propuesta busca establecer una línea base que oriente la restauración de ecosistemas ribereños, alineándose con los lineamientos establecidos en la Política Nacional de Áreas de Protección de Ríos, Quebradas, Arroyos y Nacientes, que promueve la recuperación de cobertura arbórea y la protección integral de sistemas fluviales (MINAE, 2020). La preservación de estas zonas resulta crucial para reducir riesgos de contaminación y asegurar un abastecimiento sostenible de agua subterránea, aspectos que pueden condicionar las decisiones de uso del territorio (Paris et al., 2019). Por tanto, este estudio tiene como objetivo identificar y caracterizar las áreas de protección hídrica en la cuenca del río Siquiares, analizando los cambios en el uso de la tierra durante el período 1997-2023 y evaluando sus implicaciones para la gestión integral de la cuenca.

Materiales y métodos

Ubicación del área: La microcuenca del río Siquiaries se extiende sobre una superficie aproximada de 12,0 km², con un perímetro de 24,2 km y una longitud total de 12,8 km. Esta área incluye los distritos de Barrio San José, San Antonio, Turrúcares y La Garita, delimitada al norte por La Garita, al sur por Mora, al este por La Guácima y al oeste por Atenas (Figura 1). La microcuenca se caracteriza por su forma alargada, extendiéndose en dirección noroeste-suroeste. Aunque cuenta con áreas de terreno llano, en ciertos tramos a lo largo de los cursos fluviales, se presentan relieves abruptos que forman cañones con paredes empinadas. Esta, forma parte del sistema del río Alajuela, desde su nacimiento en el Coyol de Alajuela hasta su unión con el río Alajuela en Cebadilla. A lo largo de su recorrido, atraviesa localidades como Ciruelas, Siquiaries y Turrúcares. En la microcuenca se presentan usos de tierra tales como residenciales y comerciales, así como diversas actividades industriales. Estos incluyen empresas que producen carnes, lácteos, solventes, alimentos a base de pescado, productos médicos, fabricación de artículos de PVC, empaque y aislamiento, textiles, electrónicas, pinturas y acabados de construcción, así como alimentos para pollo y embutidos cárnicos (Álvarez, 2017).

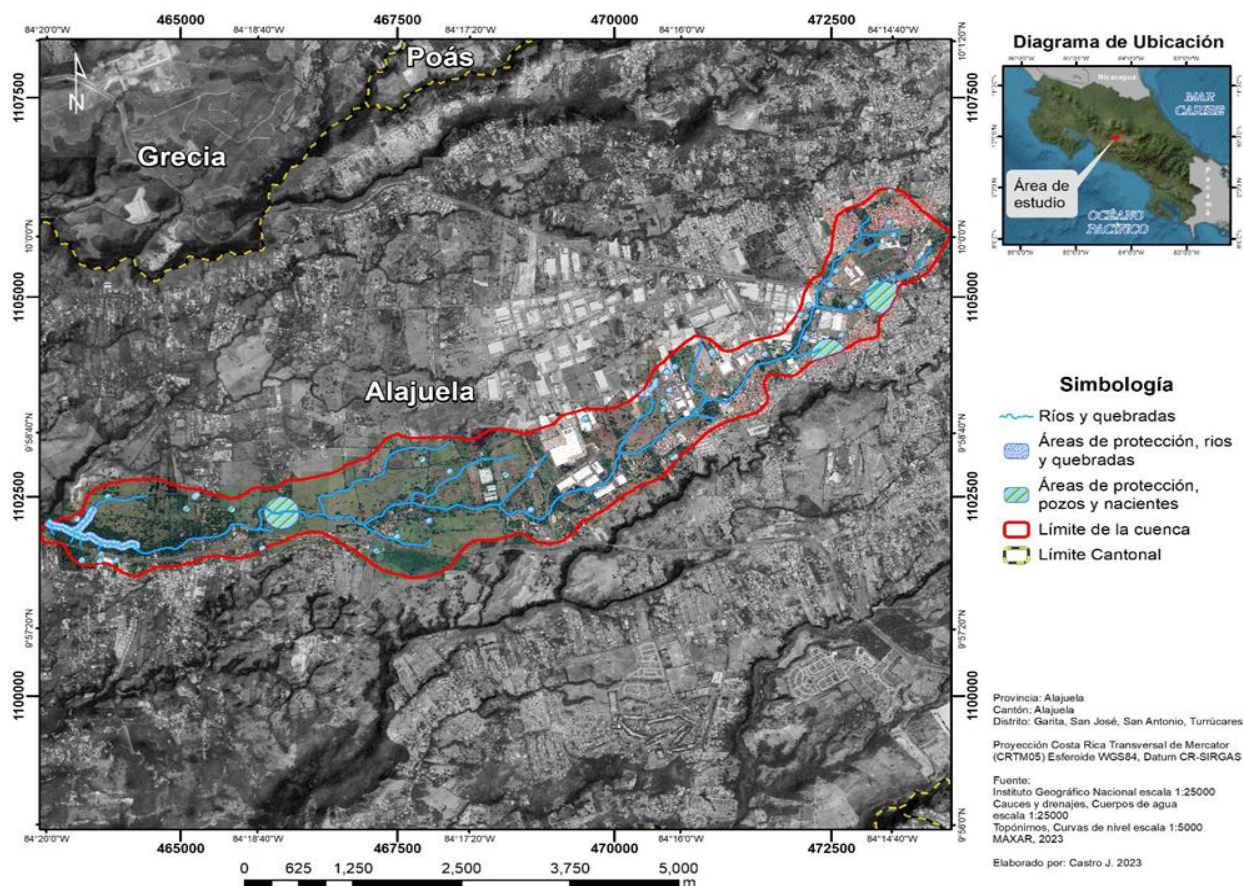


FIGURA 1. Ubicación y áreas de protección de los ríos, quebradas, pozos y nacientes de la cuenca del río Siquiaries, Alajuela.

Procedimiento Metodológico

Identificación de áreas de protección y sistema de drenajes: Para la determinación de las áreas de protección, la construcción del sistema de drenajes y la delimitación de cauces en el área de estudio, se empleó cartografía basada en curvas de nivel a escala 1:10,000 (PRUGAM, 2007). La información cartográfica fue verificada y validada mediante visitas de campo sistemáticas, utilizando como recursos complementarios fotografías aéreas e imágenes satelitales de alta resolución. Con el propósito de rectificar y actualizar la clasificación de cauces de dominio público estipulada por el Instituto Geográfico Nacional a escala 1:25,000, se realizó un proceso de verificación in situ que permitió ajustar la información a las condiciones reales observadas en el terreno al momento del estudio.

Generación del modelo digital de elevación: El Modelo Digital de Elevación (MDE) se generó a partir de las curvas de nivel del proyecto PRUGAM (2007), procesadas con una resolución espacial de 1 metro por píxel. A partir de este modelo base, se derivó una superficie de pendientes expresada en porcentaje, la cual fue clasificada en cuatro categorías siguiendo la metodología establecida para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica (MAG, 1991) y los lineamientos del Decreto Ejecutivo N° 35869 (MINAE, 2010) "*Manual para la clasificación de tierras dedicadas a la conservación de los recursos naturales dentro de la zona marítimo terrestre en Costa Rica*". La clasificación de pendientes se estableció en los siguientes rangos: 0% - 59.9% de pendiente para diferentes categorías de uso, y mayor a 60% de pendiente, clasificada como Tierras de Aptitud Forestal (TAF) según lo establecido en el Decreto Ejecutivo N° 35869 (MINAE, 2010).

Determinación de áreas de protección de cuerpos de agua: La delimitación de las áreas de protección de los cuerpos de agua dentro del área de estudio se fundamentó en el marco normativo establecido por el Artículo 33 de la Ley Forestal 7575 (1996) y su reglamento (1997), el Artículo 31 de la Ley de Aguas 249 (1949), y la actualización de declaratoria de los distritos urbanos a nivel nacional (La Gaceta N°27, 2023). Se identificó la presencia de pozos, nacientes y nacientes captadas en el sitio de estudio, aplicando sus respectivos radios de protección de 40, 100 y 200 metros, conforme a lo establecido en el Artículo 33 de la Ley Forestal 7575 (1996), Artículo 21 del Decreto 31545-S-MINAE, Artículo 8 de la Ley de Aguas 249 (1949), Oficio DM-1715-2009 del MINAE, y la Política Nacional de Áreas de Protección de Ríos, Quebradas, Arroyos y Nacientes 2020-2040 (MINAE, 2020).

Análisis de cambios de uso de la tierra (1997-2023): Para la clasificación del uso de la tierra (2023) se realizó mediante una metodología híbrida que combinó clasificación supervisada y rectificación manual. Para la clasificación supervisada se utilizaron 1,681 puntos de entrenamiento, generando un archivo ráster con resolución espacial de 1×1 metro procesado en ArcGIS v.10.8.2 (ESRI, 2021). La rectificación manual se ejecutó utilizando material fotográfico disponible en la plataforma Google Earth (Maxar, 2023) y verificación mediante visitas de campo para validar las clasificaciones preliminares. Para la clasificación del uso de la tierra (1997), se emplearon fotografías del proyecto TERRA a escala 1:40,000. Se creó un fotomosaico y se generó la capa de información utilizando como base la clasificación desarrollada para 2023, aplicando un método de interpretación manual para la asignación de categorías. Se establecieron cinco categorías de uso de la tierra representativas para la zona de trabajo en ambos períodos temporales analizados. Para la elaboración del análisis de los conflictos de uso de la tierra en las áreas de protección, se realizó mediante la superposición y análisis espacial de la información generada a partir de la interpretación de imágenes del año 2023 con las áreas de protección correspondientes a los cursos de agua, pozos y nacientes identificados dentro de la cuenca de estudio.

Resultados y discusión

Caracterización de pendientes y áreas de protección: El análisis de pendientes en la microcuenca del río Siquiaries revela un patrón espacial diferenciado que influye significativamente en la dinámica hidrológica. De acuerdo con lo establecido en la Ley Forestal 7575 (1996) y su reglamento (1997), la caracterización topográfica permite evaluar la efectividad de las zonas de protección actuales. En la parte alta de la cuenca predominan pendientes entre 0 y 10%, condición que favorece la infiltración del agua y reduce los procesos erosivos, contribuyendo así a la protección del recurso hídrico y su ecosistema asociado. La zona media presenta pendientes intermedias (11-40%) en las áreas que atraviesan los drenajes principales, donde se constata el cumplimiento de los 10 metros de protección establecidos por la legislación forestal para áreas urbanas. En contraste, la parte baja exhibe pendientes superiores al 40% en las proximidades de los cauces, donde corresponde aplicar un área de protección de 50 metros. En estos sectores, la mayor velocidad del flujo hídrico genera incrementos en la escorrentía superficial, intensificando los procesos erosivos y reduciendo la capacidad de infiltración. Esta condición topográfica refuerza la importancia de respetar las zonas de protección hídrica, tal como señalan Romero et al. (2014) respecto al rol fundamental de la legislación en la conservación y restauración de estas áreas.

Desarrollo urbano-industrial y transformación del paisaje : La microcuenca del río Siquiaries se encuentra inmersa en una región de notable crecimiento económico para la provincia de Alajuela. La zona central alberga desarrollos industriales y zonas francas que constituyen importantes motores económicos, especialmente industrias manufactureras generadoras de divisas significativas para el país. Durante el período analizado se registraron importantes proyectos habitacionales y un incremento sustancial del comercio local, factores que han provocado una transformación acelerada del paisaje en las proximidades de las zonas de protección de la cuenca (Álvarez, 2017).

Invasión de áreas de protección y degradación ambiental: Se identificaron sectores críticos en las zonas alta y media de la cuenca donde se presenta invasión de las áreas de protección de ríos y quebradas. Estos procesos se acompañan de una reducción progresiva de la cobertura forestal y la presencia de desechos sólidos y líquidos en los cauces, generando procesos erosivos y estrechamiento de los canales que favorecen la ocurrencia de inundaciones. Estos fenómenos se pueden deber al cambio de uso de la tierra en la microcuenca. Diversos autores (Mas et al., 2004; Miranda-Aragón et al., 2013; Camacho-Sanabria et al., 2015; Delphin et al., 2016) han documentado que el ritmo acelerado de transformación territorial provoca modificaciones significativas en el uso del suelo, debido al crecimiento de la población que demanda una gran cantidad de servicios, educación, salud, vivienda, adecuada red vial, agua, entre otros. Sahagún y Reyes (2018) complementan esta perspectiva al afirmar que los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal, derivados de la expansión de actividades antrópicas, generan impactos negativos sobre la biodiversidad, afectan la provisión de servicios ecosistémicos y contribuyen significativamente a los procesos de cambio climático a escala regional.

Análisis de cambios en el uso de la tierra (1997-2023): Dentro de las transformaciones principales, se muestra un análisis comparativo entre 1997 y 2023 y evidencia cambios significativos en la configuración del paisaje de la cuenca. Se identificaron ocho categorías de uso de la tierra, observándose transformaciones notables durante los 26 años de estudio (Tabla 1). La categoría de pastos constituye el uso predominante en ambos períodos, aunque su extensión disminuyó aproximadamente 10% entre 1997 y 2023. Esta reducción responde al avance de actividades asociadas al desarrollo económico de la región. La presencia de ganado en zonas ribereñas compacta el suelo, lo que reduce la infiltración de agua. Esto deteriora los márgenes de los cuerpos hídricos y disminuye los niveles freáticos (Romero et al., 2014) (Figura 2).

Tabla 1. Usos de la tierra en la microcuenca de Siquiaries para el período 1997-2023

Uso de la Tierra	1997		2023	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Pastos	689.60	59.0%	542.11	46.4%
Cultivos	255.20	21.8%	95.05	8.1%
Bosque	117.06	10.0%	147.75	12.6%
Infraestructura	57.79	4.9%	283.53	24.3%
Suelo descubierto	20.55	1.8%	33.24	2.8%
Red Vial	17.30	1.5%	33.03	2.8%
Pastos arbolados	11.38	1.0%	32.80	2.8%
Laguna	0.01	0.0%	1.39	0.1%
Total	1168.90	100%	1168.90	100%

Según el Plan de Desarrollo Cantonal de Alajuela (2013-2023), los distritos de Turrúcares y La Garita se caracterizan por el predominio de áreas destinadas a pastos, contrastando notablemente con la presencia de centros urbanos, zonas industriales, actividades pecuarias y turísticas que generan diversas superficies impermeables, modificando significativamente los patrones de escorrentía.



Figura 2. Uso de la tierra en la zona ribereña de la microcuenca del río Siquiaries, Alvarez, 2025.

Respecto al uso de infraestructura experimentó un incremento notable del 19.4%, reflejando la transformación de la cuenca hacia un carácter urbano. Este crecimiento se concentra en las partes media y alta, específicamente en zonas francas, comercio e industria orientados al desarrollo económico y la generación de empleo regional, algunos con enfoques de sostenibilidad.

La red vial aumentó aproximadamente 1.3%, crecimiento directamente relacionado con el desarrollo urbano-industrial de la zona (Tabla 1). Este incremento en superficies impermeables tiene implicaciones directas en los patrones hidrológicos de la cuenca. Así mismo, se muestra una recuperación del uso de la cobertura forestal, donde aumentó moderadamente (2.6%) durante el período 1997-2023, concentrándose principalmente en la parte baja de la cuenca. Este incremento puede atribuirse a procesos de reforestación activa o rehabilitación natural de áreas degradadas (Figuras 3 y 4).

Análisis de conflictos en áreas de protección

Por otra parte, se las zonas de protección en la cuenca del río Siquiares representan el 38.43% del uso forestal total, constituyendo el 29.35% del paisaje general de la cuenca. A pesar de ubicarse en una región de significativo desarrollo urbano, este uso mantiene una representación considerable (Tabla 2).

Tabla 2. Usos de la tierra en zonas de protección de la cuenca de Siquiares 2023.

Uso	Área (ha)	%	% total del paisaje
Bosque	43.37	38.43%	29.35%
Pastos	41.46	36.74%	7.65%
Infraestructura	16.00	14.18%	5.64%
Cultivos	4.74	4.20%	4.99%
Suelo descubierto	3.47	3.08%	10.44%
Red Vial	2.58	2.29%	7.82%
Pastos arbolados	1.23	1.09%	3.74%
Total	112.85	100.00%	69.63%

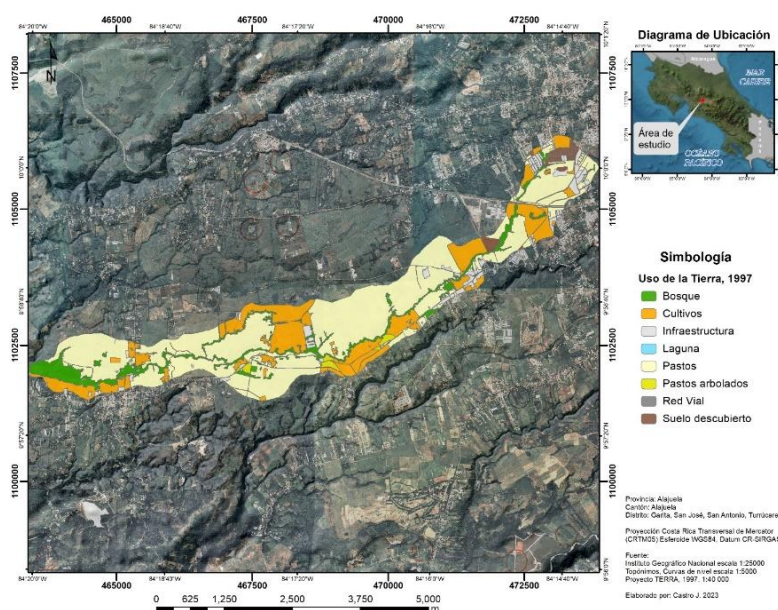


Figura 3. Clasificación de usos de la tierra en la cuenca de Siquiaraes, año 1997.

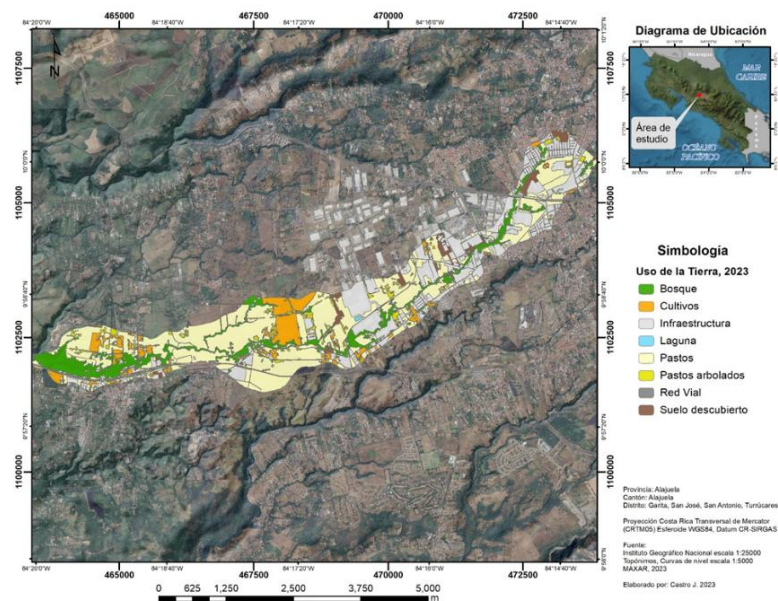


Figura 4. Clasificación de usos de la tierra en la cuenca de Siquiaraes, año 2023

También se identifica conflictos críticos, como lo es la presencia de pastos en un 36.74% de las áreas de protección, evidencia la necesidad de establecer cobertura forestal para mejorar las condiciones hídricas de la red fluvial. Las zonas ribereñas son sistemas de alta complejidad ecológica, la cobertura forestal que se encuentra en ella, desempeña funciones importantes, como la estabilización de las riberas, el aporte de materia orgánica, el refugio para la fauna, la filtración de nutrientes, la regulación de la temperatura y la protección contra la erosión.

Los bosques ribereños son un componente clave de las zonas ribereñas, sistemas ecológicos de gran complejidad. Estos bosques cumplen funciones esenciales como: estabilizar las riberas, aportar materia orgánica y energía, servir de refugio para la fauna, filtrar nutrientes, regular la temperatura y la productividad del agua, conectar el paisaje y proteger contra la erosión (Romero et al., 2014).

El uso urbano en las áreas de protección alcanza el 14.18%, resultado de la expansión descontrolada, el desarrollo sin planificación adecuada y el uso inadecuado de la tierra, factores vinculados a deficiencias en la gobernanza que han impactado significativamente la degradación de la cuenca (PEDRR, 2011). En Siquiaries, este deterioro se manifiesta a través de deforestación, alteración de cauces, contaminación urbana y proliferación de superficies impermeables. Por esta razón, a lo largo de la historia, los ríos han sido lugares estratégicos para el establecimiento urbano (Gualdoni et al. 2011). Producto de ello, dichos asentamientos humanos que se concentran cerca de las zonas de protección hídrica generan una presión al ecosistema que hay en ella (Allan 2004, Guevara et al. 2008, Canizales et al. 2010). Por tanto se debe de tratar de mantener o asegurar un balance con las condiciones de la cuenca y el desarrollo socioeconómico en ella de manera sostenible (Mintegui y Robredo 1994).

Dentro de las implicaciones ecológicas y servicios ecosistémicos, se identifican transformaciones documentadas están sujetas a cambios continuos debido a la dinámica del paisaje Goni del Río, Rafael E. (2024). Los cambios de uso de la tierra constituyen indicadores que reflejan procesos, tendencias e inercias del aprovechamiento territorial (Guevara, López & Santiago, 2022). La sustitución de vegetación natural por cultivos o actividades antrópicas genera efectos en el aporte de materia orgánica al suelo (Helfrich et al., 2008), modifica las condiciones del microclima, incluyendo la temperatura y el régimen de humedad (Bravo et al., 2004), altera la estructura edáfica y los procesos biológicos que regulan la descomposición de materia orgánica (Ruiz y Paolini, 2005; Sanderman y Amundson, 2003). De acuerdo con las estrategias de gestión de la microcuenca se pueden implementar soluciones basadas en la naturaleza, incluyendo reforestación, infraestructura verde en las zonas de protección y prácticas sostenibles de manejo territorial, lo cual puede contribuir significativamente a mitigar los impactos de la urbanización en la microcuenca (Schemie, 2021). Estas intervenciones no solo mejoran la calidad del agua, sino que también favorecen la retención hídrica y reducen la erosión del suelo.

Para una gestión integrada de cuencas, la planificación es necesaria y se revela como componente clave para mantener el equilibrio entre desarrollo urbano y conservación de recursos hídricos. La implementación de enfoques de gestión integrada que consideren la interconexión entre uso de la tierra, recursos hídricos y desarrollo urbano puede abordar efectivamente los desafíos de la rápida urbanización (PEDRR, 2011).

Así mismo la incorporación de infraestructura verde en la planificación urbana constituye una estrategia fundamental para la protección de cuencas hidrográficas. Elementos como zanjas vegetadas, techos verdes y pavimentos permeables representan alternativas eficaces para gestionar aguas pluviales, reducir escorrentía superficial y preservar la calidad hídrica en entornos urbanos. Este proceso implica la revisión y fortalecimiento de regulaciones de zonificación, planificación del uso del tierra y evaluaciones de impacto ambiental, con el objetivo de asegurar un desarrollo urbano sostenible (Lee, 2000). La mejora y aplicación efectiva de marcos regulatorios vinculados al uso de la tierra, calidad del agua y preservación de cuencas constituye un paso crucial para gestionar los impactos de la urbanización. La colaboración entre servicios públicos de agua, gobiernos locales y entidades privadas ofrece oportunidades para movilizar recursos financieros y conocimientos especializados (PEDRR, 2011).

De acuerdo con las necesidades de conservación, se concluye que la limitada cobertura forestal que alcanza solo el 47% en las áreas de protección evidencia una preocupante deficiencia en la preservación. La presencia de invasiones y construcciones (19%), junto con pastos limpios y zonas verdes artificiales (14%), indica la necesidad urgente de establecer medidas efectivas para asegurar la conservación de las áreas de protección. Se requiere de la implementación de políticas nacionales, como la Política Nacional de Áreas de Protección de Ríos, Quebradas, Arroyos y Nacientes resulta fundamental para lograr la recuperación, rehabilitación y resguardo mediante mecanismos eficientes de coordinación interinstitucional y participación ciudadana. Dentro de las estrategias de restauración, se requiere el fortalecimiento de la legislación vigente para respaldar la creación de mecanismos de conservación y restauración verdaderamente eficaces, implementando acciones y políticas destinados a la conservación de las áreas ribereñas para el manejo sostenible de los recursos hídricos en la microcuenca de Siquiares.

Las áreas de protección ofrecen suministro de calidad de agua, control de la erosión, belleza paisajística, hábitat de flora y fauna, y cumplen funciones ecológicas y de conservación de la biodiversidad. Por esta razón, es fundamental implementar estrategias de gestión que promuevan un uso más eficiente y racional de los servicios que brindan (Fernández et al. 2009). Las zonas de protección de pozos y áreas de protección de suministro de agua subterránea constituyen estrategias esenciales para minimizar riesgos de contaminación y garantizar suministro seguro. Su implementación requiere restricciones en el uso de la tierra, modificaciones en procesos industriales, cambios en el tratamiento de desechos y efluentes, controles sistemáticos de niveles y calidad de aguas subterráneas, e inspecciones detalladas de pozos.

Agradecimientos

Agradecimiento al proyecto denominado *Determinación de las áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Siquiaries, Alajuela como insumo para la generación de lineamientos en el manejo integral de la cuenca* 2023-2025 de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional.

Referencias

- Allan, J. D. (2004). Landscapes and riverscapes: The influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 257–284. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>
- Álvarez, J. M. (2017). Caracterización y diagnóstico preliminar en la microcuenca del río Siquiaries, Alajuela, para promover su manejo apropiado [Trabajo final de graduación o informe técnico, institución no especificada].
- Arauz, V. K. (2018). Contribución de los sistemas agroforestales a la sostenibilidad del servicio ecosistémico hídrico en las cuencas de Costa Rica. *Revista AgroInnovación en el Trópico Húmedo*, 1(1), 78–84.
- Bravo, C. Z., Lozano, R. M., Hernández-Hernández, L., Piñango, B., y Moreno, B. (2004). Efecto de diferentes especies de coberturas sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa de maíz. *Bioagro*, 16(3), 163–174.
- Camacho-Sanabria, J. M., Juan, J. I., Pineda, N. B., Cadena, E. G., Bravo, L. C., y Sánchez, M. (2015). Cambios de cobertura/uso de suelo en una porción de la zona de transición mexicana de montaña. *Madera y Bosques*, 21(1), 93–112. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.211428>
- Cañizales, P., Alanís, G., Favela, S., Torres, M., Alanís, E., Jiménez, J., y Padilla, H. (2010). Efecto de la actividad turística en la diversidad y estructura del bosque de galería en el noreste de México. *CienciaUANL*, 13(1), 55–63.
- Delphin, S., Escobedo, F. J., Abd-Elrahman, A., y Cropper, W. P. (2016). Urbanization as a land use change driver of forest ecosystem services. *Land Use Policy*, 54, 188–199. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.02.011>
- Díaz Gómez, A. R., y Gaspari, F. J. (2017). Cambio de cobertura y uso del suelo en la zona ribereña en cuencas subtropicales del noroeste argentino. **Quebracho - Revista de Ciencias Forestales*, 25*(1-2), 28–39.
- Dostal, C. B. (2007). Delimitación empírica de áreas prioritarias para el manejo del recurso hídrico en Costa Rica. *Reflexiones*, 86(2), 145–156.
- Environmental Systems Research Institute. (2021). ArcGIS (Versión 10.8.2) [Software de sistema de información geográfica]. <https://www.esri.com>

Fernández, L., Rau, J., y Arriagada, A. (2009). Calidad de la vegetación ribereña del río Maullín (41°28'S; 72°59'O) utilizando el índice QBR. *Gayana Botánica*, 66(2), 269–278. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432009000200013>

Goni del Río, R. E. (2024). Patrones de uso de suelo agrícola y residencial y sus efectos sobre la mantención de la biodiversidad ribereña en el sur de Chile (N.º 31499563) [Tesis doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile]. ProQuest Dissertations & Theses Global. <https://doi.org/10.7764/tesisUC/AGR/85456>

Gualdoni, C., Duarte, C., y Medeo, E. (2011). Estado ecológico de dos arroyos serranos al sur de Córdoba, Argentina. *Ecología Austral*, 21(2), 149–162.

Guevara, G., Reinoso, G., García, J. E., Franco, L. M., García, L. J., Yara, D. C., Briñez, N., Ocampo, M., Quintana, M. I., Pava, D. Y., Flórez, N. Y., Ávila, M. F., Hernández, E. E., Lozano, L. A., Guapucal, M., Borrero, D. A., y Olaya, E. J. (2008). Aportes para el análisis de ecosistemas fluviales: una visión desde ambientes ribereños. *Revista Tumbaga*, (3), 109–127.

Guevara-Romero, M. L., López-Domínguez, S. M., y Santiago-Azpiazu, G. C. (2022). Análisis del cambio de uso de suelo en zonas agrícolas a través de SIG. *Revista Ciencia e Innovación Agroalimentaria de la Universidad de Guanajuato*, 3(2), 1–26.

Helfrich, M., Ludwig, B., Potthoff, M., y Flessa, H. (2008). Effect of litter quality and soil fungi on macroaggregate dynamics and associated partitioning of litter carbon and nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), 1823–1835. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.006>

Hernández, A. (2010). *Capacidad del uso de la tierra y los cambios en la cuenca del río Nosara, Guanacaste, 1979-2006* [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica].

Hernández-Hernández, R. M., Pulido-Moncada, M., Caballero, R., Cabrales, E., Castro, I., Ramírez, E., y Mendoza, B. (2013). Influencia del cambio de uso de la tierra sobre las sustancias húmicas y la estabilidad de los agregados en suelos de sabanas y bosques tropicales. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 30(4), 551–572.

La Gaceta. (s. f.). Diario oficial de la República de Costa Rica.

Lee, M. (2000). Watershed protection challenges in rapidly urbanizing regions: The case of Tegucigalpa, Honduras. *Water International*, 25(2), 214–221. <https://doi.org/10.1080/02508060008686821>

Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (1996, 13 de febrero). Ley Forestal (Ley N.º 7575). La Gaceta Diario Oficial.

Mas, J. F., Velázquez, A., Días-Gallegos, R. J., Mayorga-Saucedo, R., Alcantara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T., y Pérez-Vega, A. (2004). Assessing land use/cover changes: A nationwide multidecadate spatial database for Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5(4), 249–261. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.06.002>

Mattey-Trigueros, D., Navarro-Picado, J., Obando-Rodríguez, P., Fonseca-Sánchez, A., y Núñez-Solís, C. (2017). Caracterización de la cobertura vegetal dentro de la franja de protección del río Copey, Jacó, Puntarenas, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 1(58), 275–294. <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.58-1.11>

Maxar Technologies. (2023). Google Earth [Software geoespacial]. Google LLC. <https://www.google.com/earth>

Ministerio de Agricultura y Ganadería & Ministerio de Recursos Naturales, Energía y Minas de Costa Rica. (1991). Metodología para la determinación de la capacidad de uso de las tierras de Costa Rica (2.ª ed.).

Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones. (2010, 24 de marzo). *Decreto Ejecutivo N.º 35869-MINAET: Manual para la clasificación de tierras dedicadas a la conservación de los recursos naturales dentro de la Zona Marítimo Terrestre en Costa Rica*. La Gaceta Diario Oficial, N.º 78.

Ministerio de Ambiente y Energía. (2009). *Oficio DM-1715-2009* (relacionado con el Artículo 8 de la Ley N.º 276, Ley de Aguas).

Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica. (2020). Política Nacional de Áreas de Protección de Ríos, Quebradas, Arroyos y Nacientes. https://da.go.cr/wp-content/uploads/2018/05/Politica_Nacional_Areas_Proteccion_2020.pdf

Mintegui, J., y Robredo, J. (1994). Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración hidrológico-forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería del Agua*, 1(2), 69–82. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2656>

Miranda-Aragón, L., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Pompa-García, M., y Aguirre-Salado, C. A. (2013). Tasas de deforestación en San Luis Potosí, México (1993-2007). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 201–215. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.10.074>

Municipalidad de Alajuela. (2013). Plan de Desarrollo Cantonal "Alajuela Cantón Inclusivo y Solidario" 2013-2023.

Paris, M., D'Elía, M., Pérez, M., y Pacini, J. (2019). Wellhead protection zones for sustainable groundwater supply. *Sustainable Water Resources Management*, 5(1), 161–174. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0184-6>

Partnership for Environment and Disaster Risk Reduction. (2011). Managing watersheds for urban resilience. United Nations Environment Programme.

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/14213/managing_watersheds_for_urban_resilience_PEDRR_policy_brief_2011.pdf

Presidencia de la República de Costa Rica. (2020, 28 de octubre). Política Nacional sobre Áreas de Protección de ríos, quebradas, arroyos y nacientes.

Proyecto de Reordenamiento Urbano y Gestión Ambiental del Área Metropolitana de San José. (2007). Cartografía base: Curvas de nivel 1:10000.

Rodríguez, G., y Sáez, E. (2020). *Estrategia Nacional para la Recuperación de Cuencas Urbanas 2020-2030*. Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial de Costa Rica.

Rodríguez Vindas, S. (2020). Implementación de un sistema de información geográfica para el estudio de las áreas de protección del Río María Aguilar, sector Pinares de Curridabat [Trabajo final de graduación, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

Romero, F. I., Cozano, M. A., Gangas, R. A., y Naulin, P. I. (2014). Riparian zones: Protection, restoration and legal context in Chile. *Bosque*, 35(1), 3–12. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002014000100001>

Ruiz, M., y Paolini, J. (2005). Parámetros de humificación en suelos cultivados. *Agrochimica*, 49(1-2), 79–86.

Sahagún-Sánchez, F. J., y Reyes-Hernández, H. (2018). Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *CienciaUAT*, 12(2), 6–21. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582018000100006

Sanderman, J., y Amundson, R. (2003). Biogeochemistry of decomposition and detrital processing. En H. D. Holland y K. K. Turekian (Eds.), *Treatise on geochemistry* (Vol. 8, pp. 249–316). Elsevier-Pergamon.

Schemie, D. (2021). Nature-based solutions for resilient watersheds. The Nature Conservancy. <https://www.nature.org/en-us/what-we-do/our-insights/perspectives/resilient-watersheds-nature-based-solutions/>

Vásconez, D. F. L., Cutiupala, G. M. A., Lucio, M. M. V., y Colcha, D. F. C. (2023). Delimitación y priorización de áreas de protección hídrica en la microcuenca del río Cebadas, provincia de Chimborazo, Ecuador, mediante sistemas de información geográfica. *Dominio de las Ciencias*, 9(4), 1447–1471.