

Modelo operativo del Índice de Fragilidad Ambiental bajo restricción de datos: aplicación y validación en la microcuenca Santa Marta, Costa Rica

Operational Model of the Environmental Fragility Index under
Data Constraints: Application and Validation in the Santa
Marta Micro-Watershed, Costa Rica

Modelo Operacional do Índice de Fragilidade Ambiental sob
Restrição de Dados: Aplicação e Validação na Microbacia
Santa Marta, Costa Rica

Catalina Vargas-Meneses¹

Universidad Estatal a Distancia (UNED), Costa Rica

Gladys Rincón-Polo²

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador.



Resumen

Este artículo presenta un modelo operativo del Índice de Fragilidad Ambiental (IFA) aplicado en contextos de restricción estructural de datos técnicos, institucionales y presupuestarios, mediante el estudio de la microcuenca del río Santa Marta (Tarrazú, Costa Rica). Se integraron tres variables físico-naturales (pendiente, geología superficial y amenazas naturales) mediante análisis multicriterio espacial con ponderación equivalente en entornos SIG de código abierto. El índice resultante evidenció un predominio de fragilidad media (valor promedio 2,75), con concentración de categorías altas en laderas superiores al 30 %. La coherencia espacial del modelo fue evaluada mediante superposición

- 1 Universidad Estatal a Distancia (UNED), Escuela de Ciencias Exactas y Naturales Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos, LIAS-San Marcos. Coordinadora.  cvargasm@uned.ac.cr.  <http://orcid.org/0000-0002-8555-4496>
- 2 Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM), campus Gustavo Galindo, km 30.5 Vía Perimetral, Apartado Postal 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador.  grincon@espol.edu.ec.  <http://orcid.org/0000-0002-7682-0019>

con insumos independientes, incluyendo calidad de agua, cobertura del suelo corregida y zonificación funcional, mostrando correspondencia significativa entre sectores de alta fragilidad y áreas bajo presión antrópica. A partir de esta experiencia, se proponen criterios estratégicos para su implementación progresiva en municipios rurales con limitada capacidad técnica. Se concluye que el modelo adaptado constituye una herramienta metodológicamente consistente para apoyar procesos de ordenamiento territorial preventivo en microcuencas de montaña, siempre que se expliciten sus alcances y limitaciones.

Palabras clave: fragilidad ambiental, planificación territorial, SIG, microcuenca, validación cruzada, IFA simplificado.



Abstract

This article presents an operational model of the Environmental Fragility Index (EFI) applied under conditions of structural constraints in technical, institutional, and budgetary data, using the Santa Marta micro-watershed (Tarrazú, Costa Rica) as a case study. Three key biophysical variables (slope, surface geology, and natural hazards) were integrated through spatial multi-criteria analysis with equal weighting in an open-source Geographic Information System (GIS) environment. The resulting index revealed a predominance of medium fragility (mean value of 2.75), with high-fragility categories concentrated on slopes exceeding 30%. Spatial coherence was assessed through overlay analysis with independent environmental inputs, including water quality indicators, corrected land cover data, and a functional zoning proposal, showing significant correspondence between areas of high fragility and zones under anthropogenic pressure. Based on this experience, the study proposes strategic guidelines for progressive implementation in rural municipalities with limited technical capacity. The findings demonstrate that the adapted EFI constitutes a methodologically consistent tool to support preventive territorial planning in mountainous micro-watersheds, provided that its scope and limitations are explicitly acknowledged.

Keywords: environmental fragility, territorial planning, GIS, micro-watershed, cross-validation, simplified EFI.



Resumo

Este artigo apresenta um modelo operacional do Índice de Fragilidade Ambiental (IFA) aplicado em contextos de restrição estrutural de dados técnicos, institucionais e orçamentários, por meio do estudo da microbacia do rio Santa Marta (Tarrazú, Costa Rica). Foram integradas três variáveis físico-naturais (declividade, geologia superficial e ameaças naturais) mediante análise multicritério espacial com ponderação equivalente em ambientes SIG de código aberto. O índice resultante evidenciou predominância de fragilidade média (valor médio de 2,75), com concentração de categorias altas em encostas superiores a 30%. A coerência espacial do modelo foi avaliada por meio de sobreposição com insumos independentes, incluindo qualidade da água, cobertura do solo corrigida e zoneamento funcional, demonstrando correspondência significativa entre setores de alta fragilidade e áreas sob pressão antrópica. A partir desta experiência, propõem-se critérios estratégicos para sua implementação progressiva em municípios rurais com limitada capacidade técnica. Conclui-se que o modelo adaptado constitui uma ferramenta metodologicamente consistente para apoiar processos de ordenamento territorial preventivo em microbacias de montanha, desde que seus alcances e limitações sejam explicitados.

Palavras-chave: fragilidade ambiental; ordenamento territorial; SIG; microbacia; validação cruzada; IFA simplificado.

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica, la transformación acelerada de territorios rural-urbanos ha intensificado la ocupación de zonas ambientalmente frágiles, frecuentemente sin la incorporación de criterios biofísicos en la planificación territorial ([Programa Estado de la Nación, 2023](#)). Esta situación es particularmente crítica en territorios de montaña, donde la expansión del uso del suelo sobre pendientes pronunciadas, suelos inestables y áreas expuestas a amenazas naturales incrementa la vulnerabilidad territorial.

A pesar de la existencia de instrumentos normativos orientados al ordenamiento del territorio, su aplicación en municipios rurales enfrenta limitaciones estructurales vinculadas a la disponibilidad de información geoespacial, capacidades técnicas institucionales y restricciones presupuestarias. Esta condición genera una brecha entre las exigencias regulatorias y la capacidad operativa local, afectando la calidad de las decisiones, especialmente en contextos donde la dinámica geomorfológica condiciona la estabilidad del espacio analizado ([Brovelli et al., 2017](#); [Longley et al., 2015](#)).

En este contexto, los Índices de Fragilidad Ambiental (IFA) se han consolidado como herramientas relevantes para identificar áreas vulnerables mediante la integración de variables físico-naturales y antrópicas en entornos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ([González-Briceño & Rojas-Brenes, 2020](#)). Sin embargo, su implementación se ha enfocado principalmente en esquemas integrales que requieren alta disponibilidad de información, lo que limita su aplicación en escenarios con datos incompletos.

Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar enfoques metodológicos adaptativos que permitan operacionalizar el análisis de fragilidad territorial bajo condiciones de información parcial, manteniendo coherencia conceptual con el marco normativo vigente ([Malczewski, 1999](#); [Fernández-Manrique et al., 2015](#)). Esta necesidad es especialmente relevante en microcuencas rurales, donde la ausencia de datos edáficos, socioeconómicos o ecológicos dificulta la aplicación completa del modelo tradicional.

El presente estudio propone un modelo operativo del Índice de Fragilidad Ambiental centrado en el componente físico-natural, diseñado para territorios con limitaciones estructurales de información. La propuesta

se aplica en la microcuenca de la quebrada Santa Marta, en el cantón de Tarrazú, un espacio representativo de condiciones rurales de montaña con presión antrópica creciente y limitada capacidad técnica municipal.

El objetivo es diseñar, aplicar y validar este modelo bajo restricción de datos, evaluando su coherencia espacial y su potencial como herramienta para apoyar procesos de ordenamiento territorial y gestión ambiental a escala local. La principal contribución radica en demostrar la viabilidad de un enfoque metodológico intermedio que, sin requerir información completa, mantiene consistencia técnica y responde a las condiciones reales de gestión territorial en contextos rurales.

MARCO CONCEPTUAL

Fragilidad ambiental y planificación territorial en sistemas de montaña

La fragilidad ambiental se entiende como la susceptibilidad intrínseca de un territorio a experimentar procesos de degradación o pérdida de funcionalidad ecosistémica ante presiones naturales o antrópicas. Este concepto se fundamenta en la interacción entre variables biofísicas como pendiente, litología, cobertura vegetal y régimen hidrológico y dinámicas de uso del suelo que pueden intensificar procesos de erosión, remoción en masa o alteración de servicios ecosistémicos ([Odum & Barrett, 2005](#); [Castillo & Fallas, 2017](#)).

En territorios de montaña, la fragilidad adquiere una dimensión estructural, dado que las pendientes pronunciadas, la heterogeneidad geológica y la alta energía del relieve condicionan la estabilidad geomorfológica y la dinámica hídrica. En el caso específico de la microcuenca Santa Marta, localizada en el cantón de Tarrazú, estas condiciones se combinan con un predominio de actividades cafetaleras en laderas de fuerte inclinación, expansión residencial dispersa y limitada infraestructura de control hídrico, lo que incrementa la exposición a procesos erosivos y movimientos en masa.

Diversos estudios han señalado que en estos contextos la planificación territorial debe integrar explícitamente variables físico-naturales como criterios restrictivos para la ocupación y transformación del suelo, bajo un enfoque preventivo ([Bozzano et al., 2008](#); [Jiménez-Otárola](#)

& Benegas-Negri, 2019). No obstante, en municipios rurales como Tarrazú, donde los procesos formales de planificación se desarrollan con recursos técnicos limitados y sin bases de datos espaciales actualizadas de alta resolución, la incorporación sistemática de estos criterios enfrenta importantes desafíos operativos.

Desde la perspectiva de la planificación territorial basada en evidencia, los instrumentos de evaluación espacial permiten traducir complejidad biofísica en insumos cartográficos útiles para la toma de decisiones. En este sentido, los Sistemas de Información Geográfica han facilitado la integración multicriterio de variables heterogéneas mediante procedimientos de estandarización y álgebra de mapas, consolidando metodologías reproducibles en el análisis territorial (Longley *et al.*, 2015; Malczewski, 1999). Sin embargo, la eficacia de estos instrumentos depende directamente de la calidad, resolución y actualización de la información temática disponible, condición que no siempre se cumple en microcuencas rurales fuera del Gran Área Metropolitana.

Índice de Fragilidad Ambiental como instrumento normativo y técnico

En Costa Rica, el Índice de Fragilidad Ambiental constituye un instrumento metodológico reconocido dentro del marco normativo para la evaluación de la aptitud y vulnerabilidad territorial. Su formulación oficial integra cuatro ejes temáticos: geoaptitud, edafoaptitud, bioaptitud y antroaptitud, con el objetivo de caracterizar integralmente la capacidad y limitaciones del territorio para distintos usos (MINAE, 2006).

El enfoque del IFA se sustenta en principios de evaluación multicriterio espacial, donde variables continuas o categóricas son reclasificadas en escalas ordinales comparables y posteriormente integradas mediante ponderación y superposición cartográfica. Este procedimiento permite generar gradientes espaciales de fragilidad relativa, facilitando su interpretación en procesos de zonificación y planificación (Malczewski, 1999).

No obstante, la implementación integral del modelo normativo supone la disponibilidad de información edáfica detallada, inventarios biológicos actualizados y variables socioeconómicas desagregadas, lo cual puede representar una barrera técnica y financiera en territorios rurales con limitada capacidad institucional (Bozzano *et al.*, 2008; INVU, 2022).

En la microcuenca Santa Marta, como en muchas unidades hidrográficas rurales del país, dicha información no se encuentra disponible con el nivel de desagregación requerido, o presenta escalas incompatibles con el análisis microterritorial (1:50 000 o superiores), lo que limita la aplicabilidad directa del modelo normativo completo.

Adicionalmente, la gestión territorial en estos contextos suele depender de capacidades técnicas municipales reducidas y de procesos de planificación reactivos más que preventivos, lo que refuerza la necesidad de herramientas metodológicas técnicamente sólidas, pero operativamente viables.

Restricción estructural de datos y enfoques metodológicos adaptativos

La restricción estructural de datos se refiere a la ausencia o baja resolución de información temática necesaria para aplicar modelos territoriales complejos. Este fenómeno es común en regiones rurales o periféricas, donde los levantamientos edáficos, ecológicos o socioeconómicos no se actualizan con la misma frecuencia que en áreas metropolitanas (Perdomo, 2016).

En el caso de la microcuenca Santa Marta, la información disponible proviene principalmente de fuentes institucionales nacionales (ICE, CNE, IGN), elaboradas para escalas regionales o proyectos específicos, lo que obliga a realizar procesos de adaptación cartográfica y reclasificación para su uso en análisis a escala microcuenca. Esta condición genera incertidumbres asociadas a la resolución espacial, homogeneidad temática y representatividad local de los datos.

La literatura sobre análisis espacial ha señalado la importancia de desarrollar enfoques adaptativos que prioricen variables de alta disponibilidad y robustez técnica, manteniendo coherencia conceptual con los marcos normativos sin replicarlos de manera rígida (Fernández-Manrique *et al.*, 2015; Brovelli *et al.*, 2017). En territorios rurales como Santa Marta, esta estrategia no constituye una simplificación metodológica, sino una respuesta técnica a las condiciones reales de disponibilidad de información.

Desde esta perspectiva, la adaptación parcial de instrumentos como el IFA no implica su reducción conceptual, sino su operacionalización estratégica en función de condiciones reales de datos y capacidades institucionales. Este enfoque permite generar diagnósticos preliminares

funcionales que pueden fortalecerse progresivamente conforme se disponga de información más detallada, alineándose con principios de planificación adaptativa y gestión integrada de cuencas (GWP, 2014; Jiménez-Otárola & Benegas-Negri, 2019).

Microcuenca como unidad funcional de análisis territorial

La microcuenca hidrográfica constituye una unidad funcional adecuada para el análisis territorial integrado, al articular procesos geomorfológicos, hidrológicos y de uso del suelo dentro de un sistema espacial delimitado por divisorias naturales. En sistemas de montaña, la microcuenca permite evaluar interacciones entre pendiente, geología y dinámica hídrica con mayor precisión que escalas administrativas amplias (GWP, 2014).

El enfoque de análisis a escala de microcuenca favorece la identificación de gradientes de fragilidad relativa y su vinculación con procesos locales de urbanización, expansión agrícola o degradación ambiental. Además, facilita la integración entre planificación territorial y gestión del recurso hídrico bajo principios de coherencia ecosistémica (Jiménez-Otárola & Benegas-Negri, 2019).

El análisis a escala de microcuenca permite identificar gradientes de fragilidad relativa y vincularlos con dinámicas productivas específicas, como el cultivo de café en ladera, la apertura de caminos secundarios y la ocupación de zonas cercanas a cauces. Esta aproximación resulta particularmente pertinente en contextos donde los límites administrativos no coinciden con las unidades funcionales del territorio, y donde la gestión ambiental requiere una lectura ecosistémica más que estrictamente político-administrativa.

METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque de análisis multicriterio espacial orientado a la construcción de un modelo operativo del Índice de Fragilidad Ambiental, centrado en el componente físico-natural del territorio. Este enfoque se fundamenta en la integración sistemática de variables biofísicas mediante procedimientos de estandarización y superposición cartográfica en entornos de Sistemas de Información Geográfica, metodología ampliamente documentada en la literatura especializada en evaluación territorial (Malczewski, 1999; Eastman, 2012; Longley *et al.*, 2015).

La metodología operacionaliza el componente físico-natural del IFA mediante un esquema de análisis multicriterio espacial implementado en entorno SIG, conforme a principios documentados en la literatura especializada (Malczewski, 1999; Eastman, 2012).

El procedimiento metodológico se estructuró en cuatro fases: (i) delimitación y caracterización de la unidad de análisis; (ii) selección y estandarización de variables; (iii) integración espacial y cálculo del índice; y (iv) validación cruzada con un modelo ambiental funcional independiente.

Región de estudio

La microcuenca del río Santa Marta se localiza en el distrito de San Marcos, cantón de Tarrazú, provincia de San José, Costa Rica. Tiene una extensión aproximada de 5,6 km² y está conformada por una red hidrográfica de orden 5 según Strahler, con una densidad de drenaje de 3,55 km/km². Este patrón evidencia un sistema altamente eficiente para la escorrentía, lo que incrementa el riesgo de procesos erosivos y deslizamientos en periodos lluviosos. El cauce principal de la microcuenca recorre cerca de 4 km hasta desembocar en el río Pirrís, siendo alimentado por varios afluentes menores, entre ellos la quebrada Tirrá.

En la figura 1 se presenta la ubicación geográfica y la delimitación de la microcuenca, incluyendo su relación con los principales núcleos urbanos del cantón. El relieve predominante es montañoso, con un gradiente altitudinal que va desde los 1330 hasta los 1780 msnm. La topografía se caracteriza por tres grandes laderas que convergen en una zona central más llana. Según el modelo digital de elevación empleado, las pendientes varían entre 0 % y más de 45 %.

La figura 2 muestra la distribución espacial de los rangos de pendiente, destacando la alta concentración de sectores con valores moderados a fuertes (entre 16 % y 45 %) en la zona norte y oeste, mientras que las áreas más suaves (< 8 %) se localizan principalmente en el centro y sureste de la microcuenca.

Desde el punto de vista geológico, el área está dominada por rocas ígneas de origen volcánico correspondientes a la Formación Grifo Alto, compuesta por andesitas y basaltos. Estas unidades geológicas presentan diferentes grados de meteorización y susceptibilidad a procesos de remoción en masa. En la zona sur y en el sector urbano de San Marcos, se

identifican depósitos aluviales recientes, no consolidados, que incrementan la fragilidad estructural del terreno. La figura 3 muestra la distribución de las unidades geológicas en el área de estudio, indicando las zonas con mayor vulnerabilidad desde el punto de vista litológico.

En cuanto al uso del suelo, predomina el cultivo de café, acompañado por parches de bosque secundario, pastizales y áreas urbanas en expansión. Esta cobertura refleja una alta presión antrópica, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas, donde la ocupación humana y la actividad agrícola intensiva aumentan los riesgos de degradación ambiental. La combinación de estas condiciones topográficas, geológicas y de uso del suelo justifica la aplicación de un enfoque integrado para caracterizar la fragilidad ambiental del territorio y orientar decisiones de planificación territorial.

Selección de variables y fuentes de información

Se seleccionaron tres variables del componente físico-natural: pendiente del terreno, geología superficial y amenazas naturales (deslizamientos e inundaciones). La elección respondió a tres criterios técnicos: (i) disponibilidad cartográfica institucional homogénea, (ii) relevancia estructural en procesos de inestabilidad territorial y (iii) compatibilidad espacial para su integración en formato raster.

- **Pendiente del terreno:** fue derivada a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de 30 m, procesado en QGIS. Este parámetro fue expresado en porcentaje, calculada como la relación entre el incremento vertical y la distancia horizontal multiplicada por 100 ($\tan \theta \times 100$). La clasificación en cinco rangos respondió a criterios geomorfológicos funcionales y a lineamientos de capacidad de uso de la tierra establecidos en normativa nacional (MAG, 1995) y en directrices técnicas internacionales (FAO, 2006), que reconocen este gradiente topográfico como factor limitante para la aptitud del suelo y la estabilidad del terreno. Los rangos definidos fueron: muy baja (0–7 %), baja (8–15 %), media (16–30 %), alta (31–45 %) y muy alta (>45 %). Estos umbrales permiten diferenciar niveles crecientes de restricción física y susceptibilidad a procesos erosivos y movimientos en masa. La selección de estos intervalos busca reflejar transiciones funcionales en la estabilidad de laderas, más que divisiones estadísticas arbitrarias.

- **Geología:** se utilizó cartografía geológica oficial elaborada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), a escala 1:50.000, desarrollada en el marco de estudios geotécnicos asociados al Proyecto Hidroeléctrico Pirrís. La reclasificación litológica se basó en el grado de consolidación estructural y comportamiento geotécnico esperado frente a procesos de inestabilidad. La Formación Grifo Alto fue clasificada con un nivel de fragilidad medio, mientras que los depósitos aluviales no consolidados se consideraron de fragilidad alta, dada su menor cohesión estructural.
- **Amenazas naturales:** se empleó cartografía de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), clasificando zonas de exposición a deslizamientos e inundaciones según registro histórico: desde baja hasta muy alta fragilidad. La categorización consideró la recurrencia de eventos reportados y su localización en relación con la red de drenaje y áreas urbanizadas.

Estandarización e integración multicriterio

Cada variable temática fue reclasificada a una escala ordinal homogénea de cinco categorías de fragilidad (1 = muy baja; 5 = muy alta), con el propósito de estandarizar unidades originalmente heterogéneas — porcentaje de pendiente, litología y niveles de amenaza— y posibilitar su integración comparativa en un modelo espacial único. La asignación ordinal se fundamentó en criterios técnicos específicos para cada variable, vinculados a su contribución estructural a la inestabilidad territorial y a la susceptibilidad frente a procesos erosivos y movimientos en masa.

La normalización ordinal constituye una práctica consolidada en evaluaciones multicriterio espaciales, al facilitar la transformación de variables continuas o categóricas en escalas comparables para su combinación matemática (Malczewski, 1999; Eastman, 2012). Este procedimiento garantiza coherencia metodológica en la integración posterior de variables con distinta naturaleza y dimensionalidad.

Una vez estandarizadas, las capas temáticas se integraron mediante álgebra de mapas en un entorno de Sistema de Información Geográfica. Las coberturas vectoriales originales se previamente convertidas a formato raster con tamaño de celda de 30 × 30 m, asegurando homogeneidad espacial

entre variables. El Índice de Fragilidad Ambiental adaptado ($IFA_{Adaptado}$) se calculó mediante media aritmética simple por unidad espacial, conforme a la siguiente expresión:

$$IFA_{Adaptado} = \frac{Valor_{pendiente} + Valor_{geología} + Valor_{amenaza}}{3} \quad (1)$$

La adopción de ponderación equivalente responde a la ausencia de evidencia empírica local que justifique la asignación de pesos diferenciales sin introducir sesgos subjetivos. Bajo este criterio, cada variable contribuye proporcionalmente al resultado final, permitiendo obtener una superficie continua de fragilidad estructural.

Los valores resultantes fueron posteriormente reclasificados en cinco categorías cualitativas equidistantes para facilitar su interpretación territorial (Tabla 1), sin alterar la base cuantitativa del índice.

Tabla 1. Valores de IFA y categorías de fragilidad ambiental

Valor del IFA	Categoría de Fragilidad Ambiental
1.00 – 1.49	Muy baja
1.50 – 2.49	Baja
2.50 – 3.49	Media
3.50 – 4.49	Alta
4.50 – 5.00	Muy alta

Fuente: Elaboración propia con base en los criterios de clasificación de capacidad de uso de la tierra establecidos por el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 1995) y en las directrices de descripción de suelos de la FAO (2006).

La propuesta metodológica no reproduce íntegramente el modelo normativo oficial del IFA, el cual integra cuatro ejes temáticos (geoaptitud, edafoaptitud, bioaptitud y antroaptitud), sino que operacionaliza específicamente el componente físico-natural mediante variables de alta disponibilidad y consistencia espacial. Esta adaptación mantiene coherencia conceptual con el marco normativo vigente, pero responde a condiciones reales de restricción estructural de datos en territorios rurales de montaña.

El procedimiento aplicado es replicable y comprende: (i) recopilación de cartografía base homogénea; (ii) reclasificación ordinal de variables; (iii) integración mediante álgebra de mapas con ponderación equivalente;

(iv) cálculo del valor promedio por unidad espacial; y (v) reclasificación interpretativa en categorías cualitativas.

Este enfoque permite generar un diagnóstico preliminar de fragilidad estructural en microcuencas rurales donde no se dispone de información completa para todos los ejes normativos, aportando insumos técnicamente consistentes para procesos de ordenamiento territorial y gestión ambiental local.

Validación cruzada con variables ambientales

Con el fin de evaluar la coherencia espacial del modelo estructural de fragilidad, se realizó una validación cruzada mediante contraste con un análisis ambiental funcional previamente desarrollado para la microcuenca ([Goyenaga, 2025](#)). Este enfoque integra variables de calidad de agua, uso del suelo y condiciones hidroambientales, permitiendo analizar procesos de deterioro asociados a presión antrópica.

Las concentraciones de *Escherichia coli* registradas en puntos de muestreo georreferenciados fueron interpoladas para generar una superficie continua de contaminación bacteriana. El uso del suelo se reclasificó según intensidad de intervención antrópica. La conectividad hidrológica se estimó a partir de análisis de flujo acumulado derivados del MDE, mientras que las características hidrogeológicas se asociaron a la permeabilidad relativa de las formaciones geológicas.

La validación consistió en la superposición cartográfica entre el IFA adaptado y el modelo funcional, mediante análisis de intersección raster. Se calculó el porcentaje de coincidencia espacial entre las categorías de fragilidad alta y muy alta del IFA y las áreas clasificadas con mayor deterioro ambiental en el modelo funcional. Este procedimiento permitió cuantificar el grado de correspondencia estructural entre ambos enfoques y evaluar la coherencia espacial del modelo propuesto.

Análisis comparativo con propuesta de zonificación funcional existente

Como parte del proceso de evaluación externa del modelo de fragilidad ambiental adaptado, se incorporó un análisis comparativo con la propuesta de zonificación funcional desarrollada por [Goyenaga \(2025\)](#), para la microcuenca Santa Marta. Dicha cartografía fue considerada

un insumo independiente, elaborado bajo criterios de planificación territorial funcional, que integra variables de uso del suelo, dinámica urbana, protección hídrica y expansión regulada. Su incorporación en esta investigación no tuvo como finalidad validar el Índice de Fragilidad Ambiental, sino contrastar la coherencia espacial entre un modelo físico-ambiental (IFA) y un esquema funcional de ordenamiento territorial.

La comparación se realizó en el nivel de superposición espacial, sin modificar ni reinterpretar la zonificación original, permitiendo analizar coincidencias, divergencias y consistencia territorial entre ambos enfoques. Este procedimiento se fundamenta en metodologías de validación cruzada espacial utilizadas en planificación territorial basada en evidencia (Burrough & McDonnell, 1998; Longley *et al.*, 2015).

Limitaciones metodológicas e incertidumbre espacial

El modelo propuesto presenta limitaciones asociadas a la resolución espacial de la cartografía base (30×30 m) y a la escala original de los insumos geológicos (1:50.000), lo cual puede generar efectos de generalización espacial y pérdida de detalle en unidades territoriales pequeñas. Asimismo, la conversión de información vectorial a formato raster implica procesos de discretización que pueden introducir variaciones en los límites de clases y en la representación de fenómenos lineales o puntuales.

La reclasificación ordinal de variables continuas y categóricas en cinco niveles de fragilidad, si bien metodológicamente consistente con enfoques multicriterio (Malczewski, 1999; Eastman, 2012), supone simplificaciones que pueden atenuar gradientes internos y relaciones no lineales entre factores geomorfológicos y de amenaza. De igual forma, la adopción de ponderación equivalente entre variables responde a la ausencia de evidencia empírica local que permita establecer pesos diferenciales objetivos, pero podría no capturar jerarquías funcionales específicas del territorio.

Adicionalmente, la ausencia de variables edáficas, biológicas y socioeconómicas de alta resolución limita la integración completa de los cuatro ejes del modelo normativo del IFA, por lo que el índice resultante debe interpretarse como una aproximación estructural al componente físico-natural de la fragilidad territorial.

En consecuencia, los resultados constituyen un diagnóstico preliminar orientado a apoyar procesos de planificación territorial y gestión ambiental, y no deben considerarse como una zonificación normativa definitiva ni como sustituto del instrumento oficial integral.

La resolución espacial de 30 m utilizada en este estudio introduce un nivel de generalización que puede suavizar microvariaciones topográficas relevantes, particularmente en sistemas de ladera abrupta. La literatura especializada en modelación ambiental ha señalado que la escala espacial influye directamente en la sensibilidad del análisis y en la representación de procesos geomorfológicos locales (Panagos *et al.*, 2015). No obstante, en estudios exploratorios de escala microcuenca con insumos institucionales disponibles, este nivel de resolución se considera técnicamente aceptable como aproximación preliminar, siempre que se expliciten los márgenes de incertidumbre asociados (Pontius & Millones, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados por variable del componente físico-natural

El análisis espacial individual de la pendiente del terreno, la geología superficial y las amenazas naturales permitió reconocer los patrones físicos que configuran la fragilidad territorial en la microcuenca Santa Marta. La revisión diferenciada de cada variable evidenció que no todas inciden de la misma manera sobre el territorio: mientras algunas actúan como condicionantes estructurales permanentes, otras presentan efectos más localizados o dependientes del contexto.

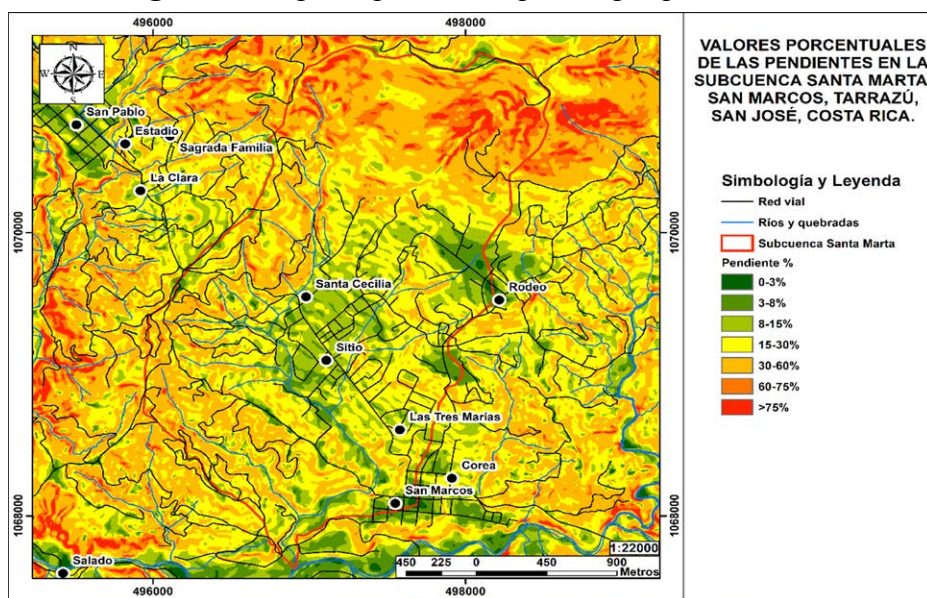
Antes de integrarlas en el índice compuesto, se examinó su comportamiento espacial con el propósito de identificar concentraciones críticas y comprender su peso relativo dentro del sistema físico-natural. Los resultados muestran que la pendiente del terreno constituye el principal factor morfodinámico, debido a la amplia proporción de superficie con inclinaciones que superan los umbrales asociados a inestabilidad de ladera. La geología introduce contrastes vinculados al grado de consolidación litológica y a la respuesta diferencial frente a procesos de remoción en masa. En cambio, las amenazas naturales registradas se distribuyen de forma más puntual, concentradas en sectores específicos donde convergen condiciones topográficas y antecedentes históricos de eventos.

En los apartados siguientes se presentan los resultados específicos para cada variable, incorporando la proporción territorial de cada categoría, su patrón espacial dominante y su relación con áreas actualmente intervenidas. Este análisis permite comprender cómo cada componente contribuye, de manera diferenciada, a la configuración del gradiente de fragilidad en la microcuenca.

Pendiente del terreno

La configuración topográfica de la microcuenca Santa Marta se caracteriza por un predominio de laderas con inclinaciones intermedias y altas, lo que define un territorio morfodinámicamente activo (Figura 1). La representación cartográfica evidencia que las pendientes superiores al 15 % dominan la mayor parte del área, con concentración marcada en las laderas centrales, noreste y suroeste. Las zonas de baja inclinación se restringen a áreas de valle y sectores próximos al cauce principal, ocupando superficies reducidas en comparación con el conjunto de la cuenca.

Figura 1: Mapa de pendientes por rangos porcentuales



Fuente: Elaboración propia con base en la cartografía escala 1:25 000 del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT, 2025).

La lectura espacial del mapa permite identificar un patrón continuo de gradiente ascendente desde las zonas de fondo de valle hacia las divisorias de ladera, donde la continuidad topográfica favorece procesos de escorrentía concentrada y limita la estabilidad superficial. Este patrón coincide con áreas donde se desarrollan actividades agroproductivas y asentamientos rurales dispersos, generando una superposición entre condiciones morfológicas restrictivas y presión antrópica.

La cuantificación detallada de estas clases se presenta en la Tabla 2. Como se observa, únicamente el 7.19 % del territorio presenta pendientes inferiores al 8 %, mientras que el 75.09 % supera el 15 %. De manera particularmente relevante, el 39.68 % de la microcuenca se ubica por encima del 30 %, umbral que la literatura reconoce como crítico para la intensificación de procesos de erosión hídrica y susceptibilidad a movimientos en masa en sistemas de montaña (FAO, 2006; Castillo & Fallas, 2017).

Tabla 2: Distribución espacial de la pendiente del terreno en la microcuenca Santa Marta

Rango de pendiente (%)	Área (km ²)	% del total
0–3	0.0268	0.49 %
3–8	0.3659	6.70 %
8–15	0.9682	17.73 %
15–30	1.9339	35.41 %
30–60	1.8551	33.96 %
60–75	0.2996	5.48 %
75 o más	0.0131	0.24 %
Total	5.4627	100 %

Fuente: Elaboración propia.

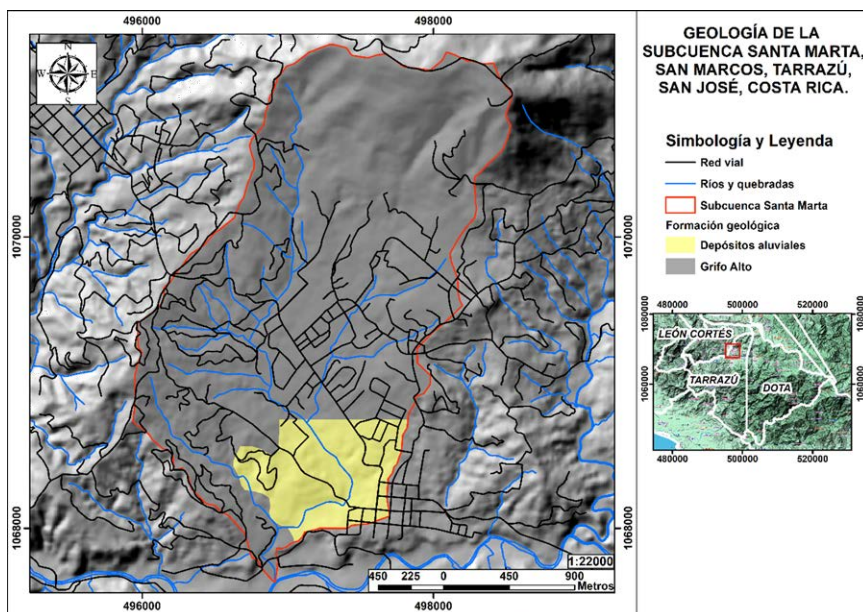
Desde una perspectiva geomorfológica, la predominancia de pendientes superiores a 15 % confirma que la inclinación del relieve constituye el principal condicionante estructural del territorio. En sistemas de montaña, gradientes topográficos superiores al 30 % incrementan la velocidad de escorrentía, reducen la infiltración efectiva y favorecen procesos de erosión concentrada (Odum & Barrett, 2005). En el contexto cafetalero local, este comportamiento adquiere relevancia adicional, ya que se ha documentado que en terrenos con inclinaciones mayores al 30 % el riesgo de pérdida de suelo aumenta significativamente cuando no se implementan prácticas de conservación como terrazas o barreras vivas (CATIE, 2017).

En consecuencia, la pendiente emerge como la variable de mayor peso estructural dentro del Índice de Fragilidad Ambiental adaptado. Su amplia cobertura espacial y su influencia directa sobre la estabilidad física justifican su papel dominante en la configuración del gradiente de fragilidad territorial. En términos de planificación, los valores evidenciados en la Tabla 2 respaldan la necesidad de aplicar criterios diferenciados de regulación y manejo en laderas superiores a 30 %, así como priorizar medidas de estabilización en sectores con inclinaciones mayores a 45 % (Jiménez-Otárola & Benegas-Negri, 2019).

Geología

La configuración geológica de la microcuenca Santa Marta evidencia un claro contraste estructural entre materiales aluviales recientes localizados en la parte baja del valle y unidades volcánicas consolidadas que dominan las laderas medias y altas (Figura 2). Esta distribución espacial determina diferencias sustantivas en la respuesta del territorio frente a procesos de infiltración, estabilidad de taludes y susceptibilidad a remoción en masa.

Figura 2: Geología de la microcuenca



Fuente: Elaboración propia con base en la cartografía geológica de la Hoja Caraigres (escala 1:50 000) (Denyer & Arias, 1991) y en el estudio estratigráfico y tectónico de la parte noreste de la Hoja Dota (Obando, 2011).

La cartografía geológica muestra que los depósitos aluviales se concentran en el fondo de valle y en sectores próximos al cauce principal, donde predominan materiales no consolidados de origen fluvial (gravas, arenas y limos). Estas unidades se caracterizan por alta permeabilidad y baja cohesión estructural, lo que favorece la infiltración rápida, pero incrementa la susceptibilidad a socavación lateral e inestabilidad en condiciones de saturación (ICE, 2008; CNE, 2021). En contraste, la Formación Grifo Alto se extiende sobre la mayor parte de las laderas, compuesta por materiales volcánicos parcialmente alterados, piroclastos consolidados y rocas con fracturamiento variable (Denyer & Arias, 1991).

La distribución cuantitativa de estas unidades se presenta en la Tabla 3, se observa, como la Formación Grifo Alto ocupa aproximadamente el 87.69 % del área total de la microcuenca (4.894 km²), mientras que los depósitos aluviales representan el 12.31 % (0.688 km²). Esta predominancia de materiales volcánicos consolidados confirma que la estabilidad territorial está condicionada principalmente por procesos estructurales asociados a laderas sobre roca alterada.

Tabla 3: Distribución de unidades geológicas en la microcuenca Santa Marta

Unidad geológica	Área (km ²)	% del total
Depósitos aluviales	0.688	12.31 %
Formación Grifo Alto	4.894	87.69 %
Total	5.582	100 %

Fuente. Elaboración propia a partir de los resultados del modelo multicriterio espacial desarrollado en QGIS (QGIS Development Team, 2024).

Desde una perspectiva estructural, la diferencia entre consolidación litológica y susceptibilidad real no es lineal. Aunque la Formación Grifo Alto presenta mayor cohesión mecánica que los depósitos aluviales, su comportamiento en pendientes elevadas puede generar condiciones propicias para fracturamiento superficial, meteorización diferencial y deslizamientos en suelos derivados (Denyer & Arias, 1991). Por su parte, los depósitos aluviales, aun ubicados en zonas de menor pendiente, pueden experimentar procesos de socavación y erosión lateral cuando se altera la dinámica natural del cauce.

Debe considerarse además que la escala original del insumo geológico (1:50 000) introduce limitaciones en el análisis microterritorial.

A este nivel de representación cartográfica, unidades litológicas menores o heterogeneidades locales pueden no estar representadas con precisión, lo que implica un margen de incertidumbre en la interpretación en el nivel de microcuenca (Brovelli *et al.*, 2017; Longley *et al.*, 2015). Esta condición no invalida el análisis, pero exige cautela en la extrapolación normativa de resultados.

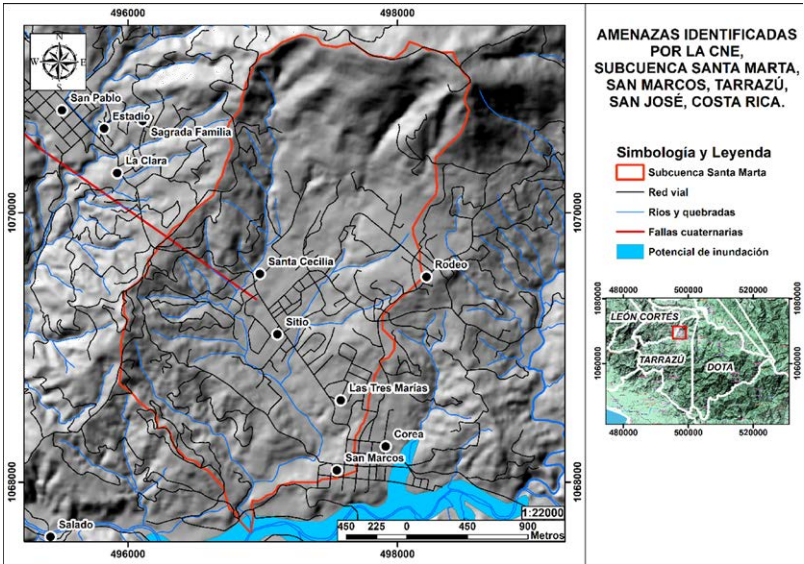
En términos de implicaciones territoriales, la predominancia de la Formación Grifo Alto en laderas inclinadas refuerza la necesidad de regulaciones diferenciadas para infraestructura, captaciones hídricas y expansión urbana. La combinación de pendiente elevada y fracturamiento volcánico incrementa la vulnerabilidad a procesos de inestabilidad superficial, particularmente bajo eventos de precipitación intensa (Castillo & Fallas, 2017). Asimismo, la presencia localizada de depósitos aluviales en zonas de valle sugiere áreas potencialmente aptas para desarrollo controlado, siempre que se consideren restricciones asociadas a inundación y dinámica fluvial.

En conjunto, la geología superficial actúa como condicionante estructural secundario dentro del Índice de Fragilidad Ambiental adaptado: no determina por sí sola la fragilidad, pero modula la respuesta del territorio ante la influencia dominante de la pendiente y la dinámica hídrica. Su incorporación permite distinguir territorios con igual inclinación, pero distinta estabilidad potencial, aportando mayor precisión al diagnóstico espacial.

Amenazas naturales

La incorporación de la cartografía oficial de susceptibilidad a deslizamientos e inundaciones elaborada por la Comisión Nacional de Emergencias (CNE) permitió integrar explícitamente la dimensión de riesgo dentro del análisis territorial de la microcuenca Santa Marta (Figura 3). Esta capa representa zonas con registro o modelación de amenaza reconocida institucionalmente y constituye un insumo clave para vincular fragilidad física con gestión preventiva del riesgo.

Figura 3: Mapa de amenazas según Comisión Nacional de Emergencias



Fuente: Elaboración propia con base en la cartografía de amenazas naturales de la Comisión Nacional de Emergencias (CNE, 2021).

La representación espacial muestra que las áreas con registro de amenaza se concentran principalmente en sectores próximos al cauce principal y en la periferia sur de la microcuenca, donde convergen pendientes moderadas a altas, materiales geológicos susceptibles y presión antrópica creciente. Destacan focos localizados en las proximidades de San Marcos y El Llano Santa María, donde la ocupación territorial se superpone con condiciones geomorfológicas restrictivas.

La cuantificación de esta variable se presenta en la Tabla 4. Como se observa, únicamente el 1.58 % del territorio (0.0879 km²) cuenta con registro oficial de amenaza, mientras que el 98.42 % restante no presenta categorización explícita dentro de la cartografía institucional.

Tabla 4: Distribución espacial de áreas con registro oficial de amenaza natural

Categoría	Área (km ²)	% del total
Sin registro de amenaza CNE	5.4930	98.42 %
Con registro de falla e inundación CNE	0.08795	1.58 %
Total	5.58096	100 %

Fuente: Elaboración propia.

Desde una perspectiva estrictamente cuantitativa, la cobertura de amenaza registrada es reducida. Sin embargo, esta proporción no debe interpretarse como ausencia generalizada de riesgo. La literatura especializada advierte que la escala de elaboración de mapas nacionales y la densidad de eventos documentados condicionan fuertemente la representación espacial de amenazas, particularmente en microcuencas rurales con baja densidad poblacional (Perdomo, 2016; Castillo & Fallas, 2017). En este sentido, la ausencia de registro cartográfico no equivale necesariamente a condiciones de estabilidad.

La escala de los insumos utilizados por la CNE responde a modelos regionales que pueden no capturar microprocesos locales asociados a variabilidad topográfica fina, cambios recientes en cobertura vegetal o intervenciones antrópicas puntuales. Esta limitación introduce un margen de subestimación potencial, especialmente en laderas con pendientes superiores a 30 % que no cuentan con historial documentado de eventos, pero presentan condiciones predisponentes (CNE, 2021).

No obstante, la variable de amenazas aporta un valor cualitativo relevante: permite identificar zonas donde la susceptibilidad ha sido institucionalmente reconocida y, por tanto, donde el principio precautorio adquiere mayor peso en decisiones de planificación. En estos sectores, la coincidencia entre registro oficial, pendiente elevada y geología susceptible refuerza la necesidad de regulación estricta, control de expansión urbana y priorización de medidas de estabilización (GWP, 2014).

En términos de contribución relativa al Índice de Fragilidad Ambiental adaptado, la variable de amenazas actúa como modulador localizado más que como condicionante estructural dominante. Su distribución restringida explica que el gradiente general de fragilidad esté determinado principalmente por la pendiente y la geología; sin embargo, en los sectores donde existe coincidencia espacial de factores, la presencia de amenaza documentada incrementa significativamente la criticidad territorial.

Desde la perspectiva del ordenamiento territorial, estos resultados evidencian la necesidad de fortalecer sistemas de monitoreo local y generación de cartografía de mayor resolución, especialmente en territorios rurales de montaña donde la dinámica geomorfológica puede activarse rápidamente ante cambios de uso del suelo o eventos de precipitación extrema (Jiménez-Otárola & Benegas-Negri, 2018). La integración de

esta variable dentro del modelo adaptado no solo introduce la dimensión de riesgo explícito, sino que permite orientar intervenciones preventivas focalizadas en zonas críticas.

Resultado integrado: Índice de Fragilidad Ambiental adaptado

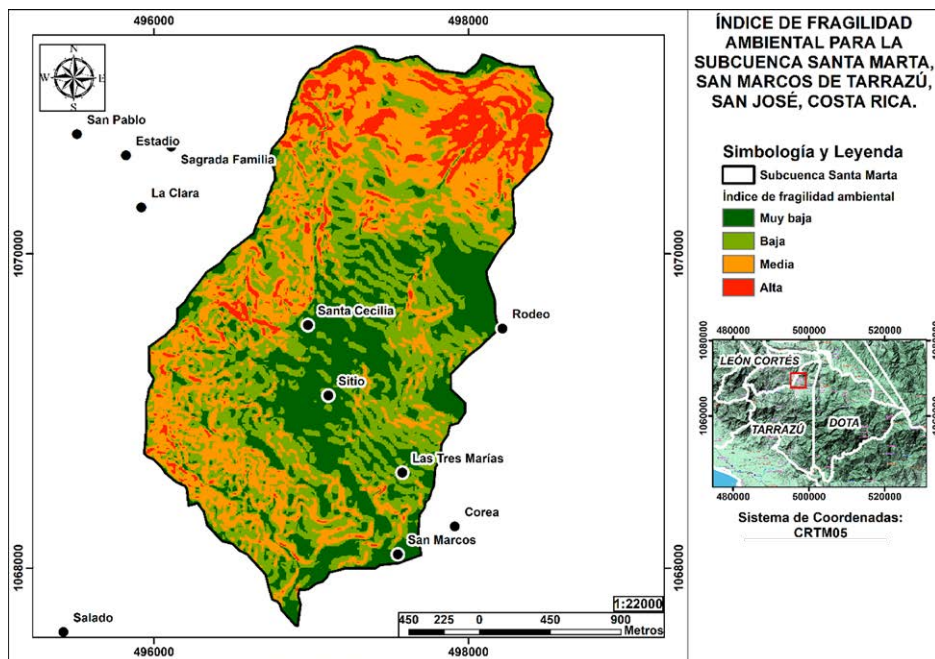
Distribución espacial del IFA

La Figura 4 presenta el mapa del Índice de Fragilidad Ambiental adaptado para la microcuenca Santa Marta, obtenido a partir de la integración de las variables pendiente, geología y amenazas naturales. La representación cartográfica evidencia un gradiente espacial continuo de fragilidad, con predominio visual de categorías media y alta en la mayor parte del territorio.

El valor promedio de 2,75 resulta de la combinación equilibrada de las categorías asignadas a cada variable físico-natural analizada. En términos interpretativos, refleja la interacción entre una condición topográfica predominantemente restrictiva (pendientes clasificadas como alta fragilidad), una estructura geológica de comportamiento intermedio y una incidencia localizada de amenazas naturales. Este resultado sintetiza la convergencia espacial de estos factores y permite ubicar el territorio dentro de una categoría de fragilidad media, lo que indica que ningún condicionante biofísico, por sí solo, determina un escenario crítico generalizado en la microcuenca.

Este resultado sintetiza la interacción de las tres variables previamente analizadas: la pendiente clasificada como alta (valor 4), la geología como media (valor 3) y las amenazas naturales como baja (valor 1). El mapa no muestra una distribución homogénea del índice, sino una configuración espacial estructurada por la morfología del relieve. La concentración de tonalidades naranja y rojo en sectores específicos confirma la influencia dominante de las pendientes pronunciadas, mientras que las zonas en verde oscuro corresponden a áreas con menor condicionamiento morfodinámico.

Figura 4: Mapa del Índice de Fragilidad Ambiental Adaptado



Fuente: Elaboración propia mediante análisis multicriterio espacial en QGIS (QGIS Development Team, 2024).

Patrón espacial del IFA

La Figura 4 evidencia una organización espacial del índice que responde a la estructura física del territorio. Las categorías de fragilidad alta se concentran en el sector norte y noreste de la microcuenca, donde el relieve presenta inclinaciones marcadas y una configuración de laderas continuas. En estos espacios, la pendiente actúa como factor dominante en la configuración del gradiente de fragilidad, condicionando procesos de escorrentía concentrada, erosión y susceptibilidad a inestabilidad superficial.

Las categorías de fragilidad media ocupan una franja amplia del territorio central y occidental. Estas zonas corresponden a áreas con pendientes moderadas y substrato volcánico predominante, donde la interacción entre litología y topografía genera condiciones intermedias de estabilidad. No se trata de territorios exentos de restricciones, sino de sectores donde los procesos geomorfológicos operan con menor intensidad relativa.

En contraste, las categorías de fragilidad baja y muy baja se localizan principalmente hacia el sur de la microcuenca y en terrazas aluviales próximas a San Marcos. En estos sectores, la menor inclinación del terreno y la presencia de depósitos aluviales favorecen mayor estabilidad superficial, aunque no eliminan completamente la exposición a dinámicas hidrológicas locales.

La distribución observada no responde a un patrón aleatorio, sino a la interacción espacial de los condicionantes físicos del territorio, donde la topografía establece el eje estructurante del índice y la geología introduce variaciones locales en la expresión de la fragilidad.

Interpretación territorial del resultado integrado

El valor promedio de 2,75 ubica a la microcuenca dentro de una categoría de fragilidad media, lo que implica la existencia de restricciones biofísicas significativas, pero no generalizadas en niveles extremos. Este resultado es característico de territorios de montaña intermedia, donde la pendiente ejerce un control morfodinámico constante, mientras que las amenazas naturales registradas no presentan una distribución extendida en todo el ámbito espacial.

La utilización de una ponderación equivalente entre variables responde a criterios de neutralidad metodológica ante ausencia de evidencia empírica local que permita establecer jerarquías diferenciales sin introducir sesgos subjetivos. En evaluaciones multicriterio espaciales, la sensibilidad del resultado frente a la asignación de pesos ha sido ampliamente discutida (Chen *et al.*, 2010).

En contextos rurales con restricción estructural de datos, diversos autores recomiendan esquemas de ponderación simple como estrategia inicial, siempre que se reconozcan sus limitaciones y se explicita la necesidad de análisis de sensibilidad en futuras fases de refinamiento (Malczewski & Rinner, 2015). Bajo este marco, la decisión metodológica adoptada mantiene coherencia técnica con prácticas consolidadas en modelación territorial.

Desde una perspectiva territorial, el índice no debe interpretarse como un instrumento de prohibición automática del uso del suelo, sino como un insumo diagnóstico que orienta la intensidad y el tipo de intervención permitida. En sectores de mayor fragilidad, particularmente en laderas de fuerte inclinación, cualquier transformación del uso del suelo incrementa la probabilidad de

procesos erosivos y remoción en masa. En áreas con niveles intermedios o bajos de susceptibilidad territorial, la planificación puede incorporar usos productivos siempre que se integren medidas de manejo adecuadas.

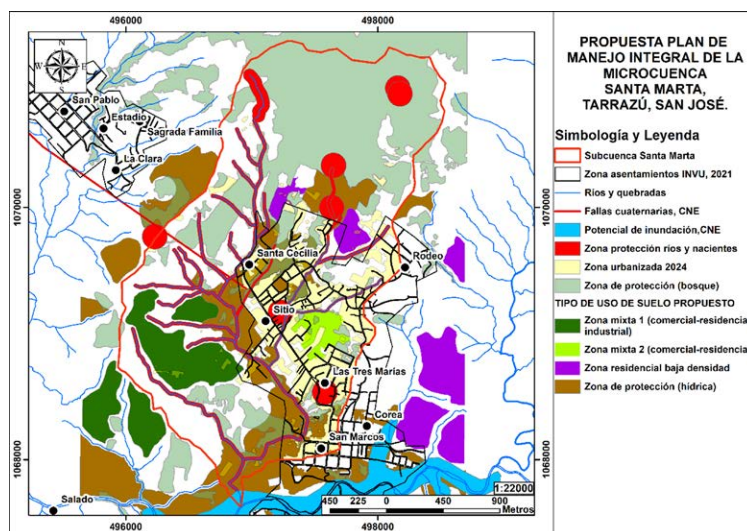
El aporte central del IFA adaptado radica en su capacidad para sintetizar condiciones estructurales del medio físico en una representación espacial comprensible para la toma de decisiones. Al integrar pendiente, geología y amenazas en una lectura conjunta, el índice ofrece una base técnica coherente para la planificación municipal y la gestión preventiva del riesgo, manteniendo alineación conceptual con el marco normativo nacional.

Validación cruzada con variables ambientales utilizando la propuesta de zonificación

Resultado de superposición espacial

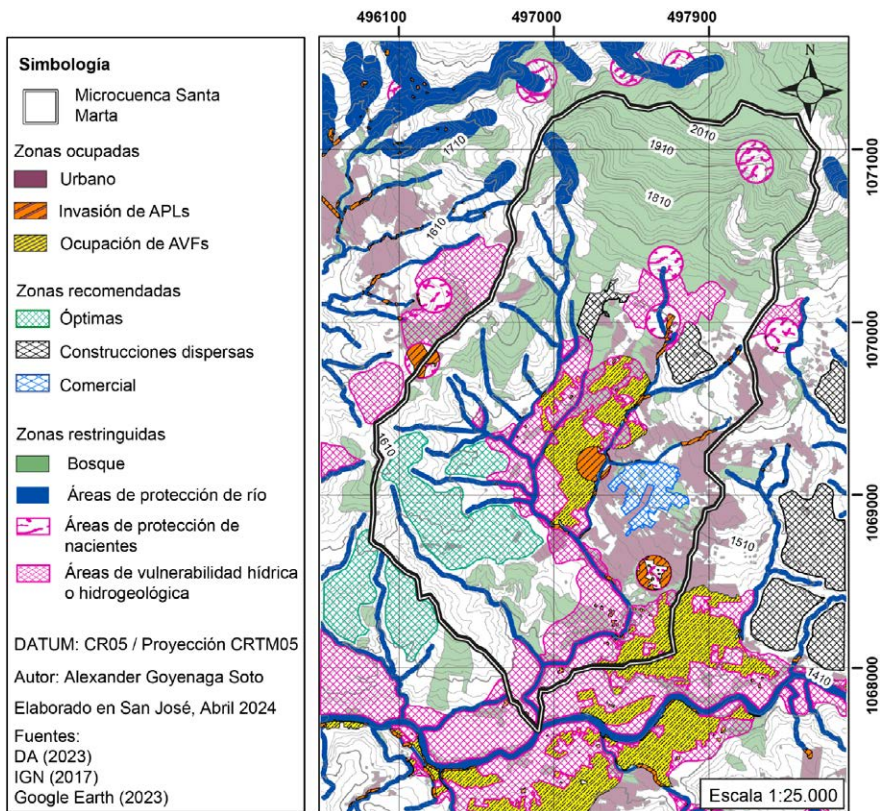
La Figura 5: Propuesta de zonificación del área de estudio presenta el gradiente de fragilidad ambiental derivado del modelo físico-ambiental adaptado, mientras que la figura 6 muestra la propuesta de zonificación funcional desarrollada por [Goyenaga \(2025\)](#). La comparación entre ambas cartografías permite evaluar la coherencia territorial entre restricciones biofísicas y asignación funcional del suelo.

Figura 5: Propuesta de zonificación del área de estudio



Nota. Elaboración propia a partir de datos procesados en QGIS.

Figura 6: Propuesta de zonificación funcional desarrollada por Goyenaga



Fuente: Tomado de Impacto del uso de suelo y la hidrogeología sobre la calidad de los cuerpos de agua superficial en la microcuenca Santa Marta, Tarrazú, Costa Rica, por A. [Goyenaga Soto \(2025\)](#), Universidad Estatal a Distancia.

La superposición espacial evidencia una correspondencia significativa entre las áreas clasificadas con fragilidad alta en el IFA (figura 4) y las zonas de protección forestal e hídrica definidas en la propuesta funcional (Figura 5). Estas coincidencias se concentran en el sector norte y noreste de la microcuenca, así como en laderas continuas asociadas a pendientes pronunciadas. Las zonas residenciales de baja densidad se ubican mayoritariamente en áreas clasificadas como fragilidad media, mostrando una relación compatible entre aptitud territorial y uso propuesto.

Las zonas mixtas tipo 1, correspondientes a los núcleos urbanos consolidados de San Marcos, El Sitio y Las Tres Marías, se sitúan

predominantemente en sectores de fragilidad baja y media. No obstante, se identifican áreas puntuales donde la expansión urbana se aproxima a zonas de mayor fragilidad, particularmente en proximidad a cauces secundarios y microquebradas.

Las zonas mixtas tipo 2, ubicadas en franjas de transición o expansión, presentan mayor heterogeneidad ambiental, con superposición parcial sobre categorías de fragilidad media y alta.

En términos generales, no se observan contradicciones espaciales estructurales entre ambas cartografías; las divergencias detectadas son localizadas y se concentran en sectores de transición territorial.

Discusión de coherencia y divergencias

La correspondencia espacial observada entre el gradiente de fragilidad ambiental (Figura 4) y la zonificación funcional propuesta por [Goyenaga \(2025\)](#) (Figura 5) indica una convergencia estructural entre restricciones biofísicas y asignación operativa del uso del suelo. Esta correspondencia se explica, en primer término, por el rol dominante de la pendiente en la configuración territorial de la microcuenca, variable que condiciona tanto la estabilidad geomorfológica como la aptitud funcional del suelo.

El modelo de fragilidad ambiental adaptado operacionaliza exclusivamente variables físico-naturales —pendiente, geología y amenazas naturales— integradas mediante un esquema multicriterio. Por su parte, la propuesta funcional incorpora dimensiones adicionales asociadas a consolidación urbana, conectividad y dinámica socioeconómica. La coincidencia espacial entre ambos enfoques, pese a sus diferencias conceptuales, sugiere que los condicionantes biofísicos estructurales influyen de manera determinante en la organización funcional del territorio.

Las divergencias puntuales identificadas en sectores de transición urbano-rural no constituyen inconsistencias del modelo, sino expresión de la interacción entre restricciones naturales y procesos antrópicos. En estos espacios, la zonificación funcional reconoce dinámicas de expansión o consolidación que no necesariamente se reflejan en el índice físico-ambiental, dado que este último no incorpora variables socioeconómicas ni de infraestructura. Este comportamiento es coherente con la naturaleza restrictiva del IFA como instrumento diagnóstico, conforme al marco conceptual del Decreto Ejecutivo 32967.

Desde la perspectiva de planificación territorial, la convergencia entre ambos modelos refuerza la consistencia técnica del análisis. La literatura en ordenamiento territorial en contextos de montaña señala que la integración entre criterios geomorfológicos y asignación funcional del suelo constituye un elemento clave para reducir vulnerabilidad y evitar conflictos de uso (Castillo & Fallas, 2017; FAO, 2018). En este sentido, la coherencia observada no implica dependencia metodológica entre modelos, sino coincidencia estructural derivada de la configuración física del territorio.

La coherencia observada entre el modelo físico-ambiental y la zonificación funcional puede interpretarse también a la luz de estudios internacionales que han demostrado que los análisis multicriterio basados en variables biofísicas tienden a anticipar patrones de ocupación territorial cuando la topografía y la estabilidad geomorfológica constituyen restricciones dominantes (Ahamed *et al.*, 2000; Debolini *et al.*, 2015).

En territorios de montaña, la pendiente actúa como variable estructurante que condiciona tanto la aptitud ecológica como la viabilidad urbana, generando convergencias espaciales entre evaluaciones biofísicas y decisiones funcionales aun cuando los modelos no compartan las mismas variables de entrada. Este comportamiento ha sido documentado en estudios comparativos de evaluación territorial mediante SIG, donde la integración de criterios geomorfológicos permite identificar zonas de uso compatible incluso bajo esquemas metodológicos distintos (Chen *et al.*, 2010).

En síntesis, el contraste espacial realizado confirma que el Índice de Fragilidad Ambiental adaptado captura gradientes biofísicos que resultan pertinentes para la planificación funcional de la microcuenca. La alineación general entre ambos enfoques respalda la utilidad del modelo físico-ambiental como base técnica para procesos de ordenamiento territorial a escala local, especialmente en microcuencas rurales donde la topografía y la estabilidad de laderas constituyen factores determinantes de sostenibilidad territorial.

Implicaciones para la planificación territorial en microcuencas rurales

El análisis desarrollado en la microcuenca Santa Marta demuestra que la integración de variables físico-naturales —pendiente, geología

superficial y amenazas naturales— permite construir un gradiente territorial de fragilidad ambiental con capacidad explicativa suficiente para orientar decisiones de ordenamiento en contextos rurales de montaña. Esta constatación adquiere relevancia en escenarios donde la información ambiental disponible es fragmentaria o de resolución intermedia, situación común en territorios fuera de áreas metropolitanas ([Jiménez-Otárola & Benegas-Negri, 2019](#)).

El Índice de Fragilidad Ambiental adaptado no sustituye los instrumentos normativos establecidos por el Decreto Ejecutivo n.º 32967-MINAE-S-TUR-MOPT ([MINAE, 2006](#)), pero sí operacionaliza su lógica preventiva mediante un enfoque basado en restricciones biofísicas estructurales. En territorios de topografía compleja, la pendiente y la estabilidad geomorfológica condicionan de manera determinante la aptitud funcional del suelo, la dinámica hidrológica y la exposición a procesos de remoción en masa ([Castillo & Fallas, 2017](#); [FAO, 2018](#)). La evidencia empírica obtenida confirma que estos factores, aun cuando se analizan sin incorporar variables socioeconómicas, generan patrones espaciales coherentes con propuestas funcionales derivadas de análisis integrales independientes.

Esta convergencia tiene implicaciones estratégicas. En primer lugar, sugiere que el diagnóstico físico-ambiental puede constituir una base técnica inicial para municipalidades que carecen de plan regulador actualizado o de estudios ambientales de alta resolución. La literatura en planificación territorial basada en evidencia enfatiza que la superposición de capas biofísicas permite identificar restricciones estructurales que deben ser consideradas antes de definir usos urbanos o productivos ([Burrough & McDonnell, 1998](#); [Longley et al., 2015](#)). En este sentido, el modelo aplicado en Santa Marta demuestra que es posible generar insumos territorialmente pertinentes a partir de información institucional disponible y técnicas SIG reproducibles.

Desde la perspectiva de vulnerabilidad territorial, la evidencia sugiere que los modelos centrados exclusivamente en variables biofísicas capturan la dimensión estructural del riesgo, pero no necesariamente la exposición socioeconómica o la capacidad adaptativa de la población ([Birkmann et al., 2013](#)).

Esta distinción resulta fundamental en territorios rurales, donde la fragilidad ecológica puede coexistir con dinámicas sociales complejas. No obstante, estudios recientes sobre evaluación de vulnerabilidad ambiental

mediante análisis multicriterio han demostrado que los modelos físico-ambientales constituyen una base robusta para procesos de planificación preventiva, en especial cuando se integran, posteriormente, con variables sociales y económicas (Sarkar *et al.*, 2021). En este sentido, el modelo aplicado en Santa Marta debe interpretarse como una plataforma técnica inicial susceptible de ampliación progresiva.

En segundo lugar, el contraste con la zonificación funcional desarrollada por Goyenaga (2025) evidencia que los gradientes de fragilidad identificados tienden a coincidir con áreas destinadas a protección hídrica y forestal, así como con sectores de transición residencial de baja densidad.

Esta correspondencia no implica dependencia metodológica entre modelos, sino reconocimiento compartido de la influencia estructural de la topografía y la geología en la organización territorial. La planificación en zonas de montaña requiere precisamente esa articulación entre condicionantes físicos y decisiones de uso del suelo para reducir vulnerabilidad y conflictos de ocupación (GWP, 2014).

En tercer lugar, el ejercicio confirma que el IFA adaptado posee un carácter modular. Su formulación puede ampliarse progresivamente mediante la incorporación de variables edáficas, cobertura del suelo, conectividad ecológica o indicadores socioeconómicos, conforme se disponga de nueva información. Este enfoque evolutivo es consistente con principios de planificación adaptativa y gestión integrada del territorio, en los cuales los instrumentos técnicos se actualizan en función del conocimiento disponible y de la dinámica local (Chacón-Barrantes & Segura-Bonilla, 2021).

No obstante, la experiencia también pone en evidencia que el uso exclusivo de variables físico-naturales limita la capacidad del índice para capturar dinámicas de presión inmobiliaria, consolidación urbana o desigualdad en el acceso a servicios básicos. Estas dimensiones, señaladas en la literatura como determinantes de la vulnerabilidad socioambiental (Perdomo, 2016), requieren análisis complementarios. Por tanto, el IFA debe entenderse como herramienta diagnóstica de base ecológica y no como sustituto de instrumentos de planificación integral.

En síntesis, la aplicación del Índice de Fragilidad Ambiental adaptado en la microcuenca Santa Marta demuestra que, aun bajo restricciones de información, es posible construir diagnósticos territoriales técnicamente

consistentes y espacialmente explícitos. Su principal aporte radica en ofrecer un criterio objetivo para identificar gradientes de restricción biofísica, facilitar la priorización de intervenciones preventivas y fortalecer la coherencia entre análisis ambiental y asignación funcional del suelo en microcuencas rurales de montaña.

La aproximación desarrollada se alinea con enfoques contemporáneos de planificación adaptativa, en los cuales los instrumentos técnicos evolucionan de manera incremental conforme se amplía la base de información disponible (Folke *et al.*, 2010). Bajo esta perspectiva, el Índice de Fragilidad Ambiental adaptado no representa una versión reducida del modelo normativo, sino una etapa metodológica operativa dentro de un proceso continuo de refinamiento territorial. Esta lógica modular permite fortalecer progresivamente la gobernanza ambiental local sin paralizar decisiones por ausencia de datos exhaustivos, aspecto crítico en microcuencas rurales de montaña.

CONCLUSIONES

La aplicación del Índice de Fragilidad Ambiental adaptado en la microcuenca Santa Marta demuestra que la integración de variables físico-naturales (pendiente, geología superficial y exposición a amenazas) permite generar un diagnóstico territorial coherente en contextos rurales de montaña con disponibilidad limitada de información. El predominio de fragilidad media (2,75) y la concentración de categorías altas en laderas con pendientes superiores al 30 % confirman el papel determinante de la topografía como condicionante estructural del territorio (Castillo & Fallas, 2017; FAO, 2018).

El modelo simplificado no sustituye el enfoque integral normativo, pero operacionaliza su lógica preventiva mediante un esquema replicable basado en restricciones biofísicas esenciales. Aun sin incorporar variables edáficas, biológicas o socioeconómicas detalladas, el modelo permite identificar gradientes territoriales consistentes que orientan decisiones preliminares de uso del suelo (Burrough & McDonnell, 1998; Jiménez-Otárola & Benegas-Negri, 2019).

La comparación con la zonificación funcional evidenció correspondencias entre áreas de alta fragilidad y zonas de protección hídrica y forestal, lo que refuerza la validez estructural del índice y confirma la influencia de los condicionantes físicos en la organización del territorio.

No obstante, la ausencia de variables socioeconómicas y edáficas limita la capacidad del modelo para capturar dinámicas de presión urbana y cambios recientes en el uso del suelo. Por ello, el IFA adaptado debe entenderse como una herramienta diagnóstica inicial, susceptible de ampliación progresiva.

En términos estratégicos, el estudio demuestra la viabilidad de un modelo operativo que, manteniendo coherencia normativa, responde a condiciones reales de gestión territorial y constituye un insumo técnico para el ordenamiento en contextos rurales con limitada capacidad institucional.

AGRADECIMIENTO

La autora agradece al geólogo **Rodrigo Ulloa Hidalgo** por su apoyo técnico en la interpretación de la información geológica y en el procesamiento de datos espaciales mediante QGIS. Asimismo, agradece al **Laboratorio de Investigación en Agua y Suelos (LIAS) de la Universidad Estatal a Distancia (UNED)** por el apoyo institucional y el acceso a información técnica utilizada en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- Ahamed, T., Rao, K., & Murthy, J. (2000). GIS-based multi-criteria evaluation for land suitability modeling. *Environmental Management*, 25(6), 709–719.
- Benegas-Negri, D., & Jiménez-Otárola, J. (2018). *Herramientas para la planificación del uso del suelo en territorios de montaña en Centroamérica*. CATIE.
- Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P., & Welle, T. (2013). Framing vulnerability, risk and societal responses: The MOVE framework. *Natural Hazards*, 67, 193–211.
- Bozzano, R., Abarca, M., & Calderón, D. (2008). *Metodologías para la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial*. CEPAL.
- Brovelli, M. A., Minghini, M., & Zamboni, G. (2017). Collaborative mapping and volunteered geographic information: A review of the main platforms and the impacts of user contributions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(7), 199. <https://doi.org/10.3390/ijgi6070199>

- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- Castillo, M., & Fallas, M. (2017). *Manual de aplicación de instrumentos técnicos en gestión de riesgos para gobiernos locales*. Comisión Nacional de Emergencias.
- CATIE. (2017). *Gestión participativa de cuencas: herramientas y metodologías*. CATIE.
- Chacón-Barrantes, S., & Segura-Bonilla, O. (2021). Evaluación multicriterio para la zonificación ambiental en cuencas hidrográficas. *Revista Geográfica de América Central*, 66(2), 135–159.
- Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). The spatial framework for weight sensitivity analysis in GIS-based multi-criteria decision making. *Environmental Modelling & Software*, 25(12), 1587–1601.
- Comisión Nacional de Emergencias. (2021). *Mapas nacionales de amenazas por deslizamientos e inundaciones*. CNE.
- Debolini, M., Marraccini, E., Dubeuf, J. P., Geijzendorffer, I., Guerra, C., Simon, M., Targetti, S., & Napoléone, C. (2015). Land use changes and rural mountain systems: A review of driving forces and processes. *Land Use Policy*, 49, 437–450.
- Denyer, P., & Arias, O. (1991). *Geología de la hoja Dota 3345 I. Cartografía geológica escala 1:50 000*. Instituto Costarricense de Electricidad.
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva manual*. Clark University.
- FAO. (2006). *Guidelines for soil description* (4th ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2018). *Guía para la evaluación de la degradación de tierras*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernández-Manrique, R., Durán, J., & González, A. (2015). La validación cruzada como estrategia metodológica para aumentar la confiabilidad de análisis espaciales. *Revista de Geografía Norte Grande*, 60, 7–28. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022015000100001>
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4).
- González-Briceño, J., & Rojas-Brenes, M. (2020). Mapas de fragilidad ambiental como base para la toma de decisiones en territorios rurales. *Ambiente y Desarrollo*, 24(1), 45–61.

- Goyenaga Soto, A. (2025). *Impacto del uso de suelo y la hidrogeología sobre la calidad de los cuerpos de agua superficial en la microcuenca Santa Marta, Tarrazú, Costa Rica* (Tesis de maestría). Universidad Estatal a Distancia.
- Global Water Partnership. (2014). *Integrated water resources management in practice*. GWP.
- Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2008). Estudios técnicos del Proyecto Hidroeléctrico Pirrís: diagnóstico ambiental y planificación hidrológica por subcuencas.
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo. (2022). *Manual de planes reguladores como instrumento de ordenamiento territorial*. INVU.
- Jiménez-Otárola, K., & Benegas-Negri, H. (2019). *Gestión integrada de cuencas hidrográficas: experiencias para América Central*. CATIE.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4th ed.). Wiley.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons.
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1995). *Reglamento para la clasificación de tierras por su capacidad de uso (Decreto Ejecutivo n.º 23214-MAG-MIRENEM)*. Gobierno de Costa Rica.
- Ministerio de Ambiente y Energía. (2006). *Guía metodológica para la aplicación del índice de fragilidad ambiental*. MINAE.
- Morales-Arce, D. (2019). Aplicación de índices geoespaciales para la gestión del riesgo en zonas montañosas. *Revista Geoespacial*, 8(2), 71–90.
- Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2005). *Fundamentals of ecology* (5th ed.). Brooks/Cole.
- Obando, L. G. (2011). *Estratigrafía y tectónica de la parte noreste de la hoja Dota (escala 1:50 000), Costa Rica*. *Revista Geológica de América Central*, 44, 63–78.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Montanarella, L. (2015). The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy*, 54, 438–447.

- Perdomo, L. A. (2016). El silencio de los datos: La invisibilización del riesgo en contextos rurales. *Gestión y Ambiente*, 19(2), 45–61.
- Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407–4429.
- Programa Estado de la Nación. (2023). *Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible 2023*. CONARE. <https://estadonacion.or.cr>
- QGIS Development Team. (2024). *QGIS geographic information system*. Open Source Geospatial Foundation. <http://qgis.org>
- Sarkar, S., Das, A., & Pal, S. C. (2021). GIS-based environmental vulnerability assessment using multi-criteria decision analysis: A review. *Sustainability*, 13(4), 2162.
- Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT). (2025). *Plataforma de información geoespacial de Costa Rica*. <https://www.snitcr.go.cr>

