

Aplicación del Índice de Fragilidad Ambiental (IFA) en la Geoaptitud Integrada del Terreno (GEOINT) como herramienta para el ordenamiento ambiental del territorio en zonas rurales del cantón de Atenas, Costa Rica

Application of the Environmental Fragility Index (EFI) in the Integrated Terrain Geoaptitude (GEOINT) as a Tool for Environmental Land-Use Planning in Rural Areas of the Atenas Canton, Costa Rica

Aplicação do Índice de Fragilidade Ambiental (IFA) na Geoaptidão Integrada do Terreno (GEOINT) como Ferramenta para o Ordenamento Ambiental do Território em Áreas Rurais do Cantão de Atenas, Costa Rica

Pablo Ignacio Ramírez Granados¹
Universidad Nacional Costa Rica (UNA)

Luis Francisco Rodríguez Soto²
Universidad Nacional Costa Rica (UNA)

-
- 1 Doctor, Geógrafo, académico de la Universidad Nacional de Costa Rica, Escuela de Ciencias Ambientales, Laboratorio de Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos, correo electrónico: pablo.ramirez.granados@una.ac.cr,  0000-0002-5082-445X
 - 2 Máster, Geógrafo, académico de la Universidad Nacional de Costa Rica, Escuela de Ciencias Geográficas, Programa para la Promoción de la Gestión y el Ordenamiento del Territorio (PROGOT), Correo electrónico: francisco.rodriguez.soto@una.cr,  0000-0003-2005-7429



Resumen

El presente estudio desarrolla una evaluación de la fragilidad ambiental en zonas rurales del cantón de Atenas, Costa Rica, a partir de la aplicación del Índice de Fragilidad Ambiental (IFA), enfocado en la Geoaptitud Integrada del Terreno (GEOINT). La investigación combina cinco factores clave: litopetrofísico, geodinámica externa, hidrogeológico, estabilidad de laderas y amenazas naturales, mediante sistemas de información geográfica (SIG), utilizando álgebra de mapas y ponderaciones definidas, con base en criterios técnico-ambientales. Mediante la integración espacial se delimitaron unidades territoriales según su nivel de fragilidad, lo cual permite orientar el ordenamiento y la gestión territorial, un enfoque preventivo. El estudio demuestra el valor de la herramienta GEOINT para el ordenamiento ambiental del territorio y destaca su potencial de aplicación en otros cantones con condiciones geográficas similares.

Palabras clave: Fragilidad ambiental, geoaptitud, Sistema de Información Geográfica, variable ambiental



Abstract

This study presents the application of the Environmental Fragility Index for the geoaptitude variable in rural areas of the Atenas canton, province of Alajuela, Costa Rica. Cabinet information was collected and primary information was processed, as well as local studies that allowed categorizing the geological and geomorphological maps and establishing values to calculate geoaptitude. Hydrogeological information, slope stability and natural hazards were integrated into the geological and geomorphological maps using map algebra in a geographic information system (GIS) for zoning and the creation of categorized areas of environmental fragility. The methodology applied through GIS produced five maps categorized according to lithopetrophysical factors, external geodynamics, slope stability, hydrogeology and natural hazards. Each of these maps shows the relationship of the geoaptitude characteristics with their geographic location and their percentage weight. The five sub-factors were analyzed in relation to current land uses, and through an arithmetic process were integrated to form the integrated geoaptitude. The environmental fragility index based on geoaptitude allowed the zoning of the territory, identifying areas with technical limitations and areas with potential for different degrees of current and future occupation.

Keywords: Environmental Fragility, Geoaptitude, Geographic Information System, Environmental Variable



Resumo

Este estudo apresenta a aplicação do Índice de Fragilidade Ambiental para a variável de geoaptidão em áreas rurais do cantão de Atenas, província de Alajuela, Costa Rica. Foram coletadas informações de gabinete e processadas informações primárias, bem como estudos locais que permitiram a categorização dos mapas geológicos e geomorfológicos e o estabelecimento de valores para calcular a geoaptidão. Informações hidrogeológicas, estabilidade de encostas e ameaças naturais foram integradas aos mapas geológicos e geomorfológicos utilizando álgebra de mapas em um sistema de informação geográfica (SIG) para a zonificação e criação de áreas categorizadas de fragilidade ambiental. A metodologia aplicada por meio do SIG resultou na produção de cinco mapas categorizados de acordo com fatores litopetrofísicos, geodinâmica externa, estabilidade

de encostas, hidrogeología e ameaças naturais. Cada um desses mapas mostra a relação das características de geoaptidão com sua localização geográfica e seu peso percentual. Os cinco subfatores foram analisados em relação aos usos atuais do solo e, por meio de um processo aritmético, integrados para formar a geoaptidão integrada. O índice de fragilidade ambiental baseado na geoaptidão permitiu a zonificação do território, identificando áreas com limitações técnicas e áreas com potencial para diferentes graus de ocupação atual e futura.

Palavras-chave: Fragilidade Ambiental, Geoaptidão, Sistema de Informação Geográfica, Variável Ambiental

INTRODUCCIÓN

El ordenamiento del territorio constituye una herramienta esencial para orientar, de manera adecuada, la gestión y planificación del espacio geográfico y sus recursos. Estos deben comprenderse como un sistema que integra múltiples elementos que se relacionan y dan origen a una estructura compleja con propiedades particulares. Esta perspectiva sistémica implica que el territorio no puede explicarse únicamente a partir del análisis aislado de sus componentes, sino que debe entenderse de manera articulada, donde lo natural, social, económico y político se entrelazan de forma dinámica y condicionando su evolución.

El estudio del territorio ha sido abordado desde múltiples enfoques disciplinares, tales como la planificación urbana, el análisis del paisaje y la geografía ambiental (Covarrubias & Cruz, 2019). Sin embargo, en las últimas décadas, el enfoque empleado en el ordenamiento del territorial ha adquirido relevancia práctica por su capacidad de integrar variables biofísicas, socioeconómicas y normativas en procesos asociados a la toma de decisiones.

En el caso de Costa Rica, uno de los mecanismos relevantes en la gestión territorial ha sido la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), concebida como un proceso técnico para fundamentar disposiciones relacionadas con proyectos que pueden afectar el ambiente, mediante la integración de información científica y criterios de sostenibilidad. Este mecanismo se encuentra derivado de la [Ley Orgánica del Ambiente No. 7554 de 1995](#), y operativizado mediante el reglamento publicado en el [Decreto Ejecutivo 32967](#), a cargo de la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA). A pesar de que esta referencia a la EIA parece

inicial, su inclusión se relaciona con el enfoque de integración ambiental en la planificación territorial costarricense, articulado con otros instrumentos posteriores.

El marco político-administrativo costarricense está conformado por siete provincias subdivididas en 84 cantones ([Ley sobre División Territorial Administrativa, 1969](#)), los cuales constituyen las unidades básicas para la gobernanza local. Cada cantón es administrado por un Concejo Municipal y una Alcaldía, ambos de elección popular, por periodos de cuatro años, con posibilidad de reelección inmediata, y con apoyo de oficinas técnicas cuya estructura depende de factores como presupuesto, población y nivel de urbanización. Esta estructura institucional representa el nivel operativo donde instrumentos como la EIA y los planes de ordenamiento territorial encuentran aplicación concreta; puntualmente, mediante los Planes Reguladores Cantonales que están establecidos por la [Ley 4240 de Planificación Urbana de 1968](#), pero que, en materia de evaluación ambiental, son regulados por la Ley Orgánica de Ambiente y por los [Decretos Ejecutivos 32967 y 44710](#).

A pesar de este marco institucional, los cantones enfrentan múltiples desafíos en el ejercicio de la gobernanza territorial, especialmente en temas como la gestión del riesgo, el uso del suelo y la provisión de servicios básicos. El Informe del Estado de la Nación ([CONARE, 2023](#)) identifica la existencia de múltiples amenazas naturales, así como pérdidas económicas recurrentes asociadas a eventos extremos, concretamente en zonas con alta vulnerabilidad ambiental. Factores como la gestión ineficiente de residuos sólidos, la contaminación del agua y del aire, y el deterioro de la infraestructura vial también representan obstáculos significativos para el desarrollo sostenible.

Con el propósito de integrar los componentes ambientales en los procesos de planificación territorial, el Estado costarricense estableció en el año 2006 un marco metodológico, mediante el [Decreto Ejecutivo No. 32967-MINAE](#), denominado: Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación del Impacto Ambiental (Manual de EIA) – Parte III, el cual otorga a la SETENA la competencia para revisar estudios ambientales y definir estándares técnicos para la zonificación territorial. La metodología contenida en este instrumento, conocida como Metodología para la Incorporación de la Variable Ambiental en los Planes de Ordenamiento Territorial (MIVAPOT), se mantiene vigente hasta la fecha y continúa

siendo aplicada en los procesos de planificación cantonal. Sin embargo, desde febrero de 2025 se publicó nueva normativa, [Decretos Ejecutivos 44710](#) y [44901](#), donde se generan nuevas opciones metodológicas para la evaluación ambiental de los Planes de Ordenamiento del Territorio.

En el caso metodológico más antiguo, la MIVAPOT propone una evaluación técnica basada en los Índices de Fragilidad Ambiental (IFA), estructurados en cuatro componentes: geoaptitud, edafoaptitud, bioaptitud y antropaptitud. Cada índice se clasifica en cinco niveles cualitativos de fragilidad: muy alto (I), alto (II), moderado (III), bajo (IV) y muy bajo (V). En esta investigación, se utiliza el término Geoaptitud Integrada del Terreno (GEOINT) para referirse al componente que agrupa diversas variables físicas (como unidades litológicas, pendientes, infiltración, estabilidad geodinámica, entre otras), siendo una denominación conceptual adoptada por los autores a partir de una interpretación integrada de los factores del decreto. Esta no aparece expresamente bajo esa sigla en el Decreto Ejecutivo, sino que constituye una propuesta analítica original de esta investigación.

El presente estudio propone aplicar el método descrito en la normativa para evaluar los aspectos ambientales del territorio, implementando el componente de geoaptitud integrada del terreno (denominado para el presente estudio como GEOINT), en zonas rurales del cantón de Atenas, específicamente en los distritos de Santa Eulalia, San José y San Isidro. El objetivo es demostrar su aplicabilidad como herramienta técnica para evaluar ambientalmente el territorio.

La aplicación metodológica para el estudio de caso se entiende en los contextos geográficos específicos, valorando la funcionalidad del instrumento orientador del uso del suelo y su posterior empleo, en sustento de las propuestas locales orientadoras al ordenamiento del territorio. Esta aplicación del método reviste particular novedad, en tanto realiza un ejercicio analítico profundo del componente geoaptitud, el cual, a pesar de ser incluido en planes anteriores, no ha sido objeto de un tratamiento detallado en estudios de escala cantonal.

La selección del componente GEOINT se justifica por su alto peso dentro del proceso metodológico, ya que influye directamente en la categorización final de aptitud territorial y condiciona los otros factores del análisis integrado. Su correcta interpretación permite guiar decisiones de uso del suelo más compatibles con la vocación natural del territorio,

aportando insumos clave para una planificación ambientalmente sostenible y territorialmente pertinente.

El ordenamiento territorial constituye una herramienta esencial para la gestión y planificación de los recursos geográficos concebidos como un sistema; es decir, un conjunto de elementos interrelacionados y articulados que conforman una totalidad orgánica, cuya comprensión no se limita únicamente a la suma de sus partes (Folch, 2003). Esta concepción sistémica del espacio geográfico permite interpretar el territorio como una construcción dinámica, donde convergen factores naturales, sociales, económicos y políticos.

Desde un enfoque técnico-conceptual, el ordenamiento territorial se concibe como un marco metodológico y operativo orientado a abordar, de forma integral, las complejidades del desarrollo espacial. En este sentido, puede entenderse como un concepto articulador de los procesos de planificación, cuyo propósito es armonizar las dinámicas humanas con las potencialidades y limitaciones del entorno (Castillo & Alexander, 2022). Constituye un instrumento fundamental para la organización y el uso del suelo, adoptado como política pública en varios países de América Latina (Calderón & Frey, 2017). Su aplicación práctica sigue representando un desafío, dado la heterogeneidad institucional, las limitaciones técnicas a nivel local y la fragmentación de las normas (Gudiño, 2015).

El estudio del territorio ha sido abordado desde diversos enfoques disciplinares, incluyendo la planificación urbana, el análisis del paisaje y la geografía ambiental (Covarrubias & Cruz, 2019). En las últimas décadas, el ordenamiento territorial ha adquirido una importancia creciente en la práctica, gracias a su capacidad para articular variables biofísicas, socioeconómicas y normativas en los procesos de toma de decisiones.

A pesar del marco institucional, los cantones enfrentan múltiples desafíos en el ejercicio de la gobernanza territorial, especialmente en temas como la gestión del riesgo, el uso del suelo y la provisión de servicios básicos. El Informe del Estado de la Nación (CONARE, 2023) identifica la existencia de múltiples amenazas naturales, así como pérdidas económicas recurrentes asociadas a eventos extremos, particularmente en zonas con alta vulnerabilidad ambiental. Factores como la gestión ineficiente de residuos sólidos, la contaminación del agua y del aire, y el deterioro de la infraestructura vial también representan obstáculos significativos.

La evaluación territorial bajo esta metodología ([Decreto Ejecutivo No. 32967-MINAE](#)) se fundamenta en los denominados Índices de Fragilidad Ambiental (IFA), estructurados en cuatro componentes: geoaptitud, edafoaptitud, bioaptitud y antroptitud. Cada índice se clasifica en cinco niveles cualitativos de fragilidad: muy alto (I), alto (II), moderado (III), bajo (IV) y muy bajo (V). De estos, el componente de Geoaptitud Integrada del Terreno es considerado el eje central, ya que integra una mayor cantidad de variables naturales como estabilidad geológica, pendientes, unidades litológicas, infiltración de aguas subterráneas y exposición a amenazas naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se enfoca en los distritos rurales de Santa Eulalia, San Isidro y San José, ubicados en el cantón de Atenas, provincia de Alajuela, en la vertiente occidental del Valle Central de Costa Rica (Figura 1). Estos distritos conforman una zona geográficamente estratégica por su localización intermedia entre la Gran Área Metropolitana (GAM) y la región occidental del país, aunque históricamente se han mantenido al margen de los procesos intensivos de urbanización. Estos distritos forman parte de la provincia de Alajuela en occidente del Valle Central de Costa Rica (Figura 1).

El área total analizada comprende una superficie de 42,51 km², lo cual representa aproximadamente el 33,41 % del territorio cantonal. Esta se

Figura 1. Ubicación del área en estudio dentro del cantón de Atenas



Fuente: [UNA \(2023\)](#)

localiza a una distancia media de 22 km al oeste de San José, la capital del país. Las coordenadas geográficas aproximadas del centroide del área en estudio son 10°00'22" latitud norte y 84°24'00" longitud oeste, con una altitud media de 747 metros sobre el nivel del mar.

Desde la perspectiva del ordenamiento del territorio, esta zona no ha sido considerada dentro de las áreas prioritarias para la expansión urbana, según la delimitación establecida por el Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana (PRUGAM), aprobado como instrumento oficial de política pública desde 1982. Estos distritos fueron declarados zona rural en ese mismo período, con base en criterios geotécnicos, topográficos y de accesibilidad vial que limitaban su desarrollo urbano, comercial o industrial por la Dirección de Urbanismo del [INVU en el Plan GAM 1982](#).

En la actualidad, estos distritos rurales colindan al norte con los cantones de Palmares, Naranjo, Grecia y San Ramón, y al sur con los distritos urbanos de Mercedes y Atenas, todos pertenecientes a la provincia de Alajuela. De acuerdo con los estudios más recientes del Plan Regulador de Atenas ([UNA, 2023](#)), el área se caracteriza por un mosaico de paisajes predominantemente rurales, donde destacan los siguientes usos del suelo:

- Actividades agrícolas: 42,97 %, en especial cultivos de café, frutas y hortalizas.
- Uso pecuario: 33,07 %, orientado a la ganadería de pequeña y mediana escala.
- Bosques naturales: 8,61 %, en zonas de ladera y cobertura boscosa remanente.
- Crecimiento urbano lineal: 7,53 %, asociado a núcleos habitacionales dispersos y ejes viales secundarios.
- Otros usos (cuerpos de agua, áreas descubiertas, charrales): 7,82 %.

Un aspecto emergente, que requiere especial atención, es la creciente presión del mercado inmobiliario sobre los territorios rurales, impulsada por la expansión de zonas francas y polos logísticos en el cantón vecino de Grecia. Esta dinámica ha acelerado la conversión del suelo rural hacia usos urbanos residenciales y de servicios, modificando las condiciones

tradicionales del territorio e incorporando nuevos retos para la planificación sostenible (Calderón & Frey, 2017).

En consecuencia, el área de estudio constituye un espacio clave para analizar los efectos del modelo de ordenamiento territorial costarricense en contextos rurales intermedios, donde convergen tensiones entre conservación ambiental, producción agrícola y expansión urbana no planificada.

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES

Con el objetivo de describir mejor las variables, se utilizarán las abreviaciones establecidas por Ramírez & Rodríguez (2025) para la presente investigación.

El análisis espacial de la GEOINT permite evaluar la fragilidad ambiental de un territorio a partir de múltiples factores físicos como lo son la información geológica, geomorfológica, hidrogeológica y de amenazas naturales para estimar la susceptibilidad del terreno ante procesos antrópicos y naturales.

Las unidades del mapa geológico y el mapa geomorfológico son clasificadas numérica y cualitativamente de mayor a menor susceptibilidad de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 1: Clasificación numérica y cualitativa del mapa geológico y geomorfológico

Valor numérico	Niveles cuantitativos	Clasificación numérica	Descripción por colores
1	Muy Alta Fragilidad Ambiental (MAFA)	I	Rojo
2	Alta Fragilidad Ambiental (AFA)	II	Naranja
3	Moderada Fragilidad Ambiental (MFA)	III	Amarillo
4	Bajo Fragilidad Ambiental (BFA)	IV	Verde claro
5	Muy Bajo Fragilidad Ambiental (MBFA)	V	Verde oscuro

Fuente: UNA (2023)

Una vez definida la calificación de cada variable, se llevó a cabo un análisis por álgebra de mapas utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG), ArcGIS 10, que permitió la integración espacial, la ponderación y la cuantificación de los diferentes factores considerados.

Los cinco factores que conforman el factor GEOINT son los siguientes: litopetrofísico (LITO), geodinámica externa (GEOEXT), hidrogeológico (HIDGEO), estabilidad de ladera (ESTLAD) y amenazas naturales (AMENAT):

LITO: Considera la composición geológica del área de estudio. A partir de una revisión exhaustiva de fuentes secundarias (mapas geológicos, estudios técnicos y bases de datos nacionales). La interpretación fue complementada mediante trabajo de campo, con el objetivo de verificar las unidades litológicas presentes y su distribución geográfica. Comprende la información referente a propiedades específicas de rocas y suelos. Incluye las siguientes variables: 1. dureza de la roca, 2. consistencia del suelo, 3. factor de lineación, 4. grado de meteorización, 5. espesor del suelo, 6. contenido de arcilla y 7. porosidad/permeabilidad.

GEOEXT: Se evaluaron las formas geomorfológicas del terreno mediante la interpretación de imágenes aéreas, mapas topográficos y modelos digitales de elevación (MDE). Posteriormente, se realizaron giras de campo para validar las unidades previamente determinadas. Incluye información sobre formas de relieve y topografía.

HIDGEO: Este factor integró información de instituciones públicas y otra información de escritorio, incluyendo también publicaciones científicas y estudios técnicos específicos del área. Contempla información de pozos, acuíferos y manantiales.

ESTLAD: Integró la información anterior y luego se reclasificó para obtener la estabilidad de ladera. Adicionalmente, se evaluó la cobertura vegetal como variable de estabilidad natural del terreno. Toda la información fue integrada y clasificada en el SIG. Integra información sobre las características del relieve y la precipitación.

AMENAT: Se agrupó la información anterior, además de los principales eventos naturales que podrían incidir sobre el territorio. Influye todas las amenazas de origen geológico e hidrometeorológico.

GEOINT: Fue cuantificado mediante el cálculo numérico y la clasificación de los factores arriba mencionados, logrando una integración

de todos los factores. Esta integración permitió identificar áreas con mayor susceptibilidad a impactos geoambientales, las cuales representan zonas críticas para la planificación territorial y deben ser consideradas prioritarias en procesos de regulación del uso de la tierra.

Finalmente, en cuanto a la cuantificación de las matrices por GEOINT, se integra la información geográfica aportada a través de la suma de los valores y la división por el número de factores, es decir un promedio aritmético. El procedimiento de cálculo numérico de forma ilustrativa se muestra en la Figura 2:

Figura 2. Esquema ilustrativo de la cuantificación del GEOINT a partir de la suma de los subfactores y la división total

LITO					GEOEXT					HIDGEO			
1	1	2	2		1	2	2	3		2	2	3	2
1	2	2	2		1	3	3	3		1	2	3	2
3	3	3	2	+	3	4	3	3	+	1	1	3	2
3	3	5	5		3	4	5	5		4	4	5	5
ESTLAD					AMENAT					GEOINT			
2	2	2	2		1	3	4	4		1	2	3	3
2	3	2	2		1	2	2	4		1	2	2	3
3	3	3	3	+	4	3	2	2	=	3	3	3	2
5	5	5	5		3	3	3	3		4	4	5	5

Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Unidades geológicas y estructurales

Formación Grifo Alto (Grupo Aguacate)

Está constituida por rocas volcánicas basáltico-andesíticas y piroclásticas (Rojas, 2013).

Formación Tiribí

En la zona de estudio la formación se caracteriza por poseer dos facies. La primera constituida por fiammes y líticos lávicos en una matriz vidriosa color gris claro a negro. La segunda se caracteriza por estar

compuesta por fragmentos de bombas escoriáceas negras y grises, líticos lávicos, en una matriz de ceniza media grisácea.

Falla La Garita

Posee una longitud de aproximadamente 16 km (Denyer *et al.*, 2003). En el área de estudio tiene una longitud de 1200 metros. Corresponde con un fallamiento de desplazamiento lateral izquierdo de rumbo noreste (Denyer *et al.*, 2003). Muestra alineaciones geomorfológicas que incluyen valles lineales y un posible valle desviado por desplazamiento horizontal de tipo izquierdo (Montero & Rojas, 2001).

Falla Zarcero

Presenta una longitud que, en promedio, ronda los 15 a 30 km (Rojas, 2011). En el área de estudio presenta una distancia de 2,6 km. Aparece como una falla poco extensa orientada noroeste (Alvarado *et al.*, 1988). Se infiere un movimiento normal con un plano de falla inclinado hacia el noreste (Montero *et al.*, 1998).

Alineamiento Alto López – Los Bajos

Se caracteriza por una longitud de 3,5 kilómetros generando un valle lineal.

Unidades geomorfológicas

Formas de origen volcano-denudacional

Depósitos de origen volcánico afectados por factores erosivos como la escorrentía y la acción fluvial, que llegan a producir movimientos de masas del terreno o bloques rocosos por la acción gravitatoria y el uso de la tierra. La principal característica es el alto grado de erosión de las rocas, creando una capa de suelo de gran espesor y pendientes muy fuertes.

Formas de origen fluvial y lacustre

Se deben a la actividad de ríos y afluentes asociados a rellenos y depósitos. Se presentan principalmente en sectores donde hay un flujo continuo de agua.

Formas de origen volcánica

Se producen por eventos asociados a una actividad volcánica constante que modifica la topografía preexistente.

Formas de origen volcánico-denudacional

Estas formas se deben a la actividad volcánica antigua. Al ser un volcanismo antiguo este ha sido afectado por los agentes erosivos, generando montañas y colinas de diferente grado de pendiente, así como zonas depositacionales, producto del acarreo y acumulación de los materiales.

Montañas denudacionales de alta pendiente

Montañas con laderas de pendiente alta entre 16° y 35° a muy alta llegando hasta 35°. Los fondos de los valles, por lo general, son angostos en forma de V. Se caracteriza por tener divisorias de aguas angostas, poco redondeadas. Presenta un patrón de drenaje, dendrítico para las quebradas de la zona debido a la pendiente. Conforme la pendiente disminuye y las quebradas pasan a los ríos principales se observa un patrón de drenaje de tipo paralelo.

Laderas denudacionales de moderada pendiente

Presenta topografía de pendientes moderadas, entre los 8° a los 16°. Esta unidad presenta un patrón de drenaje de tipo paralelo. De acuerdo con la disminución de la pendiente, los depósitos y el suelo se tienden a presentar más estables.

Laderas denudacionales de baja pendiente

Presenta topografía de ondulada a plana, debido a una disminución de la pendiente con valores < 8° inclinación. La unidad que favorece los procesos de sedimentación, generando coluvios y un abanico aluvial.

Unidad de deslizamientos

Superficie irregular, de forma cóncava. Poseen una forma alargada, siendo las zonas con mayor pendiente las laterales y suavizándose hacia el centro. Son de tipo rotacional, con ciertas cicatrices hacia la parte de la corona del deslizamiento, además se observan grietas siguiendo las curvas de nivel, y que dejan un relieve irregular, posiblemente debido a un movimiento en bloques, terrazas e irregularidades en forma de montículos y depresiones.

Formas de origen volcánico

Geoforma resultante de la actividad volcánica, dependerá del tipo de erupción, de los productos eruptivos y de la viscosidad del magma, así como del relieve preexistente de la zona afectada. Pueden generar relieves positivos, como conos volcánicos, o negativos, como calderas.

Planicies volcánicas de baja pendiente

Presenta un relieve ondulado con pendientes bajas. La forma se asocia con flujos ignimbríticos, los cuales llegaron a modificar el relieve aplanándolo, disminuyendo el ángulo de inclinación de la pendiente y favoreciendo la posterior deposición de materiales derivados de los productos de la erosión.

Cañón fluvial del Río Grande

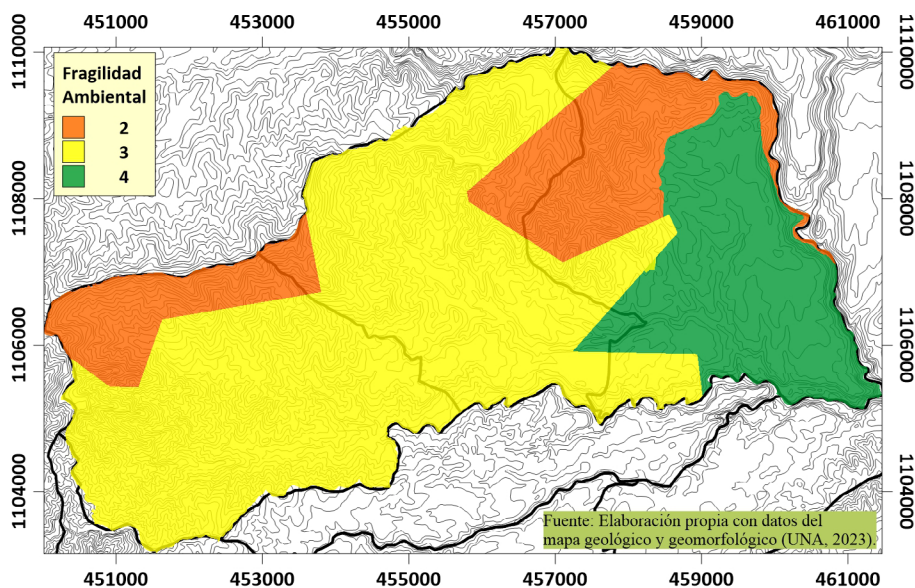
Se caracteriza por poseer cañones de hasta 100 metros de profundidad, con pendientes inclinadas en muchos casos superiores a los 35°. Su patrón de drenaje es paralelo a subparalelo, con rumbo variante (iniciando hacia el este, luego hacia el sur y, finalmente, hacia el oeste), el cual se estima posee un control estructural.

Factores de la geoaptitud

Factor LITO

El mapa resultante (Figura 3) identifica tres categorías principales de fragilidad litopetrofísica en el área de estudio: BFA (4), MFA (3) y AFA (2).

Figura 3. Factor litopetrofísico de los distritos de San Isidro, San José y Santa Eulalia



Fuente: [UNA \(2023\)](#)

Zonas AFA (2)

Estas áreas se localizan predominantemente en sectores montañosos, donde afloran rocas intensamente alteradas y sometidas a un avanzado grado de meteorización. La presencia de pendientes pronunciadas incrementa, de manera notable, la susceptibilidad a procesos de movimientos en masa, tales como reptación, formación de cárcavas y deslizamientos.

Zonas MFA (3)

Representan la mayor parte del área de estudio. Se caracterizan por la presencia de rocas con dureza y consistencia intermedias, y, por desarrollarse en terrenos con pendientes moderadas. Estas condiciones disminuyen la probabilidad de movimientos en masa; sin embargo, la menor capacidad de arrastre del agua en estos sectores puede favorecer la acumulación de sedimentos y la ocurrencia de procesos de sedimentación activos.

Zonas BFA (4)

Corresponden a sectores dominados por rocas duras, de alta consistencia y escasa fracturación. Presentan baja porosidad y reducido contenido de arcilla, lo que favorece su estabilidad estructural. Generalmente, se ubican en terrenos de pendiente suave o plana, minimizando el riesgo de deslizamientos. Desde el punto de vista geológico, estas zonas están asociadas a depósitos de ignimbritas, que confieren una mayor resistencia y estabilidad al terreno.

Las limitantes y potencialidades de cada una de las zonas se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 2: Limitantes y potencialidades de uso de la tierra para el factor de litopetrofísico

Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
AFA	Rocas altamente meteorizadas y muy fracturadas, ocurrencia de movimientos en masa, acumulación de sedimentos. Alto contenido de arcilla y baja permeabilidad, condiciones que incrementan su fragilidad ambiental y reducen la estabilidad del terreno.	Desarrollo urbano, actividades agrícolas y ganaderas extensivas, condiciones geológicas y geotécnicas que comprometen la estabilidad del terreno.	Zonas para áreas de reforestación y recarga de acuíferos, debido a sus características geológicas e hidrogeológicas.
			Zonas aptas para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas de muy bajo impacto, siempre que no impliquen una deforestación significativa y se haya comprobado previamente la ausencia de movimientos en masa.
			Presentan un potencial considerable para la explotación de agua subterránea mediante la captación de manantiales, lo que las convierte en áreas estratégicas para la gestión hídrica. Pueden destinarse a actividades turísticas de bajo impacto, compatibles con la conservación ambiental y la estabilidad del terreno.

Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
MFA	Estas zonas están asociadas a litologías menos meteorizadas y con menor grado de fracturación, lo que reduce significativamente la probabilidad de deslizamientos. Además, presentan un equilibrio entre los procesos de erosión y sedimentación, y se desarrollan sobre topografías menos disectadas, lo que contribuye a una mayor estabilidad geomorfológica del terreno.	Las zonas ubicadas en proximidad a cauces de ríos pueden estar expuestas a inundaciones y flujos de barro, especialmente durante eventos de alta precipitación.	Las zonas más estables, particularmente aquellas ubicadas en áreas planas, son adecuadas para el establecimiento de construcciones controladas y la ubicación de industrias, siempre que se respeten criterios técnicos de diseño y uso del suelo. En estos sectores también es viable el desarrollo de actividades como estaciones de servicio (gasolineras) y usos similares, debido a su mayor estabilidad geotécnica.
		Estas áreas suelen presentar una disminución en el proceso de escorrentía, lo que favorece la acumulación de agua en superficie.	Asimismo, estas áreas presentan un buen potencial para la explotación de agua subterránea mediante manantiales y pozos, gracias a sus condiciones hidrogeológicas favorables.
		Además, pueden ser susceptibles a procesos como la reptación del suelo y la formación de cárcavas y canales, incrementando así su vulnerabilidad a la degradación geomorfológica.	En las zonas con mayor pendiente, pueden permitirse actividades agrícolas y ganaderas, así como ciertos proyectos de extracción minera, siempre que se realicen bajo normativas estrictas de manejo ambiental y control de impactos. No obstante, se promueve prioritariamente su uso para la conservación y el mantenimiento de una baja densidad poblacional, con el fin de preservar la estabilidad del terreno y reducir el riesgo de degradación ambiental.

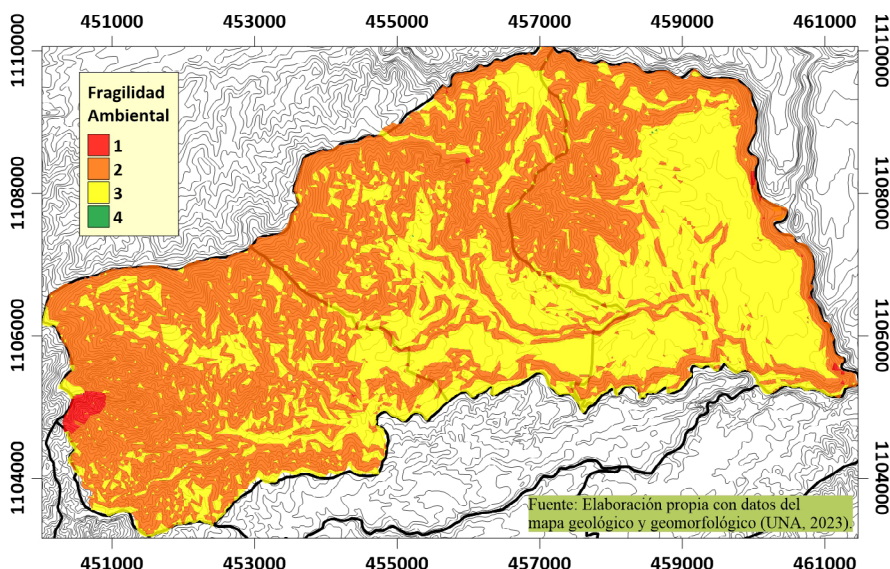
Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
BFA	Se trata de zonas conformadas por rocas sanas, con escasa fracturación, localizadas en sectores de pendiente plana. Estas condiciones favorecen una alta estabilidad estructural del terreno y reducen significativamente la susceptibilidad a procesos de inestabilidad geodinámica.	Las zonas con menor potencial para la extracción de agua subterránea están asociadas a topografías que favorecen el estancamiento del agua superficial, especialmente durante períodos de lluvias intensas. Esta característica limita la recarga de acuíferos y la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en estas áreas.	Estas zonas son adecuadas para el establecimiento de áreas comerciales o zonas francas, así como para la expansión de zonas urbanas, siempre que se respeten las normativas de uso del suelo y se lleve a cabo un adecuado manejo del entorno. Además, pueden ser apropiadas para la ubicación de gasolineras y actividades similares, debido a su estabilidad geotécnica, siempre que se consideren aspectos ambientales y de seguridad.

Fuente: Elaboración propia con datos de los mapas geológico y geomorfológico (UNA, 2023).

Factor GEOEXT

El mapa resultante (Figura 4) identifica tres categorías principales de fragilidad geodinámica externa en el área de estudio: BFA (4), MFA (3), AFA (2) y MAFA (1).

Figura 4. Factor geodinámica externa de los distritos de San Isidro, San José y Santa Eulalia



Fuente: [UNA \(2023\)](#)

Zonas MAFA (1)

La categoría tiene una representación limitada, cubriendo únicamente el 0,57 % del área, concentrándose en un sector donde se ha mapeado un deslizamiento. Estas zonas presentan pendientes de altas a muy altas, relieve relativo elevado y una alta densidad de drenaje, con un patrón predominantemente dendrítico. La dinámica propia del deslizamiento genera una relación elevada entre erosión y sedimentación, con procesos erosivos intensos en la parte alta y sedimentación activa en la parte baja del deslizamiento.

Zonas AFA (2)

El valor preponderante en el área de estudio abarca una superficie de 24,88 km², equivalente al 58,61 % del total. Esta condición se presenta principalmente en zonas con pendientes de media a muy alta, relieve relativo elevado y alta densidad de drenaje. Son áreas caracterizadas por una intensa actividad erosiva, con predominancia de patrones de drenaje de tipo dendrítico.

Zonas MFA (3)

La categoría representa el 40,8 % del área de estudio y se distribuye, esencialmente, en sectores bajos de la cuenca, en particular cerca de los cauces de los ríos y en zonas de planicies volcánicas. En estas áreas, la pendiente disminuye de manera considerable, predominando valores bajos. El patrón de drenaje evoluciona de dendrítico a paralelo o subdendrítico, lo que conlleva a una menor densidad de drenaje. En estos sectores imperan los procesos de sedimentación sobre los de erosión.

Zonas BFA (4)

Se presenta de forma muy puntual, abarcando apenas el 0,0038 % del área de estudio. Corresponde a sitios específicos donde la metodología asignó una ponderación baja, en contraste con su entorno, dominado principalmente por condiciones de tipo Moderado. Las limitantes y potencialidades de cada una de las zonas se pueden apreciar en la Tabla 3:

Tabla 3: Limitantes y potencialidades de uso de la tierra para el factor de geodinámica externa

Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
MAFA	Pendientes pronunciadas, patrón de drenaje de tipo dendrítico y alta densidad de drenaje. Presencia de movimientos en masa y acumulación de sedimentos en sectores bajos. Alta inestabilidad del terreno y una dinámica activa.	Estas zonas no son aptas para el desarrollo de actividades intensivas. Se restringe el establecimiento de infraestructura, así como cualquier tipo de uso que pueda comprometer aún más la estabilidad del terreno. La prioridad en estas áreas debe enfocarse en la conservación, restauración ambiental y monitoreo permanente.	Zonas son ideales para procesos de reforestación y pueden ser incorporadas en la zonificación destinada a la recarga de acuíferos, dada su capacidad de retención hídrica y características geológicas favorables. Potencial significativo para la explotación de agua subterránea mediante la captación de manantiales, lo que las convierte en áreas estratégicas para la gestión integral del recurso hídrico

Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
AFA	Áreas con pendientes de moderadas a muy altas, patrón de drenaje dendrítico, que presentan una elevada densidad de drenaje. Susceptibles a la generación de deslizamientos y a procesos de erosión intensa.	Condiciones de inestabilidad del terreno, se restringe el desarrollo urbano, así como la implementación de actividades agrícolas y ganaderas extensivas. Estas limitaciones responden a la alta susceptibilidad a deslizamientos, procesos erosivos activos y las características topográficas del área, que comprometen la seguridad y sostenibilidad de usos intensivos del suelo.	Procesos de reforestación y pueden ser incorporadas dentro de la zonificación destinada a la recarga de acuíferos, debido a sus características hidrogeológicas favorables.
			Potencial para la explotación de agua subterránea mediante la captación de manantiales.
			Desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas de muy bajo impacto, siempre que no impliquen una deforestación significativa y se haya verificado la ausencia de movimientos en masa. Hay que implementar medidas de control de escorrentía para evitar procesos de erosión y degradación del suelo.
MFA	Presentan pendientes suaves a moderadas, patrones de drenaje de tipo paralelo y una densidad de drenaje media, al igual que un relieve relativo moderado. Los procesos erosivos y sedimentarios se encuentran en equilibrio, lo que sugiere una mayor estabilidad del terreno.	Las áreas cercanas a los cauces de ríos pueden verse afectadas por inundaciones o flujos de barro, debido a la disminución del proceso de escorrentía y la acumulación de agua en superficie. Estas condiciones aumentan la susceptibilidad a procesos de reptación y la generación de cárcavas y canales, lo que incrementa el riesgo de inestabilidad del terreno y requiere un monitoreo constante y medidas de mitigación apropiadas.	Zonas con condiciones estables, especialmente aquellas ubicadas en sectores planos, presentan viabilidad para el establecimiento de construcciones controladas y la localización de actividades industriales. Estas áreas también ofrecen potencial para la explotación de agua subterránea, ya sea mediante manantiales o pozos.
			Pueden permitirse actividades agrícolas y ganaderas, así como algunas formas de extracción minera mientras se implementen medidas adecuadas de manejo de la escorrentía. Priorización conservación y mantener una densidad poblacional baja.
			En las zonas planas, se puede desarrollar infraestructuras como gasolineras y otras actividades de servicio similares. La intervención permitida en estas áreas está condicionado por la pendiente del terreno.

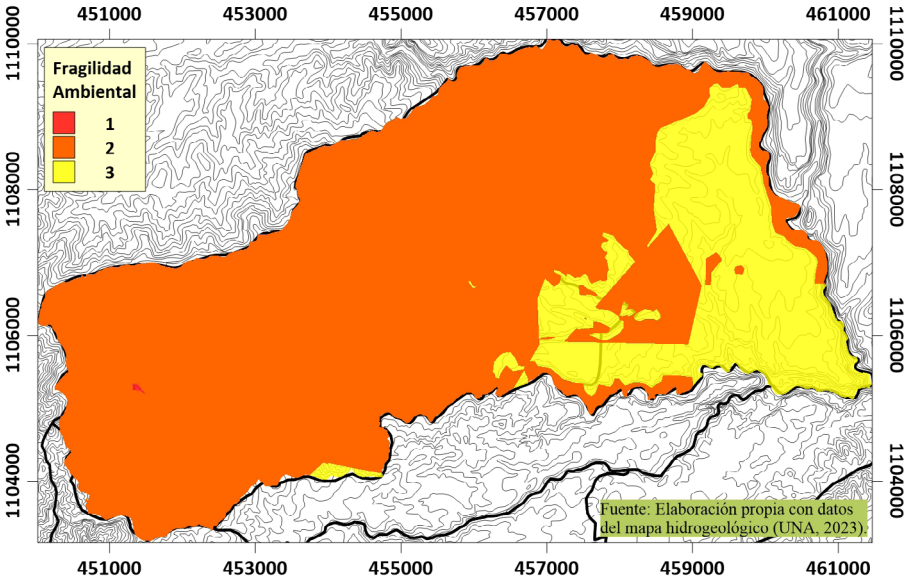
Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
BFA	Zonas de pendiente baja, procesos erosivos como sedimentarios son de baja intensidad. La densidad de drenaje es reducida y el relieve relativo bajo, condiciones estables en superficie. Bajo nivel de susceptibilidad a movimientos del terreno.	Zonas de pendiente baja, donde los procesos erosivos y sedimentarios son poco activos. La densidad de drenaje es baja y el relieve relativo también se clasifica como bajo, lo que contribuye a una mayor estabilidad del terreno.	Áreas con condiciones favorables para pequeños aprovechamientos, donde las intervenciones humanas pueden realizarse con un mínimo requerimiento de obras de contención o estabilización geotécnica, gracias a la estabilidad inherente del terreno. Estas zonas permiten un uso planificado y de bajo impacto, especialmente en actividades que no comprometan la integridad del entorno.

Fuente: Elaboración propia con datos de los mapas geológico y geomorfológico (UNA, 2023).

Factor HIDGEO

El mapa resultante (Figura 5) identifica tres categorías principales de fragilidad geodinámica externa en el área de estudio: MFA (3), AFA (2) y MAFA (1).

Figura 5. Factor hidrogeológico de los distritos de San Isidro, San José y Santa Eulalia



Fuente :UNA (2023)

Zonas MAFA (1)

Comparte características hidrogeológicas similares a las observadas en las zonas clasificadas con valor alto. Sin embargo, en este caso se registra un incremento en el valor de infiltración, lo que influye directamente en la ponderación final asignada. Esta categoría ocupa una porción muy reducida del área de estudio, representando apenas el 0,002 %.

Zonas AFA (2)

Predomina el área, abarcando una superficie de 33,75 km², lo que representa un 79,30 % del total. Esta categoría se localiza principalmente en los sectores montañosos, donde predominan rocas muy fracturadas y con alta capacidad de infiltración. Estas condiciones favorecen la presencia de dos acuíferos con potencial de moderado a alto, al menos uno de ellos de tipo libre. Esta configuración hidrogeológica propicia la aparición de numerosos manantiales, los cuales alimentan y sostienen el caudal de las quebradas y ríos de la zona.

Zonas MFA (3)

Comprende un 20,68 % del área de estudio y se presenta, por lo general, en las zonas planas de la cuenca. En estas áreas, el acuífero es de tipo confinado, ubicado a mayor profundidad y cubierto por capas de rocas impermeables, lo cual reduce su vulnerabilidad intrínseca. En esta zona no se registran manantiales, por lo que la explotación del recurso hídrico se realiza mediante pozos perforados. El potencial de producción hídrica en estos sectores se considera de bajo a moderado.

Las limitantes y potencialidades de cada una de las zonas se pueden apreciar en la Tabla 4:

Tabla 4: Limitantes y potencialidades de uso de la tierra para el factor de hidrogeología

Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
MAFA	Muy alta tasa de infiltración, presencia de acuíferos de tipo libre cubierto. Vulnerabilidad hidrogeológica de baja a moderada, directamente relacionado con la presencia de rocas muy fracturadas que permiten una alta permeabilidad del terreno. .	Captación de agua subterránea a través de manantiales. Alta tasa de infiltración es favorable para la recarga de acuíferos. Riesgo importante en términos de calidad del agua. Contaminantes como productos agroquímicos, residuos industriales o aguas residuales, pueden infiltrarse rápidamente y alcanzar el acuífero, especialmente si no existe una capa protectora o de filtración natural adecuada. Es necesario implementar medidas de protección del suelo y control de fuentes de contaminación.	Áreas adecuadas para el desarrollo de procesos de reforestación, dado que su cobertura vegetal puede contribuir significativamente a la regulación hídrica, la protección del suelo y la mejora de la infiltración. Presentan condiciones propicias para ser incluidas dentro de la zonificación orientada a la recarga de acuíferos, lo cual resulta fundamental para la gestión sostenible del recurso hídrico. Estas zonas muestran un alto potencial para la explotación de agua subterránea, tanto por medio de captación de manantiales como a través de la perforación de pozos, siempre y cuando se implementen medidas de control que garanticen la conservación del equilibrio hidrogeológico.
AFA	Alta tasa de infiltración y recarga natural de los acuíferos. Se identifican acuíferos de tipo libre cubierto, los cuales se encuentran parcialmente protegidos por capas superficiales de materiales menos permeables. La vulnerabilidad acuífera de baja a moderada. rocas están altamente fracturadas, lo que incrementa la capacidad de almacenamiento y circulación de agua subterránea.	Alta tasa de infiltración, lo que favorece la recarga natural de los acuíferos. Acuíferos de tipo libre cubierto, parcialmente protegidos por capas superficiales de materiales menos permeables. La vulnerabilidad del acuífero se clasifica como baja a moderada. Rocas altamente fracturadas.	Desarrollo de procesos de reforestación y deben priorizarse dentro de la zonificación destinada a la recarga de acuíferos, dada su alta tasa de infiltración y la presencia de acuíferos de tipo libre cubierto. Presentan un alto potencial para la explotación de agua subterránea, tanto mediante la captación de manantiales como a través de pozos. Asimismo, son aptas para actividades agrícolas y ganaderas de muy bajo impacto, siempre que no generen cargas contaminantes que puedan comprometer la calidad del recurso hídrico subterráneo.

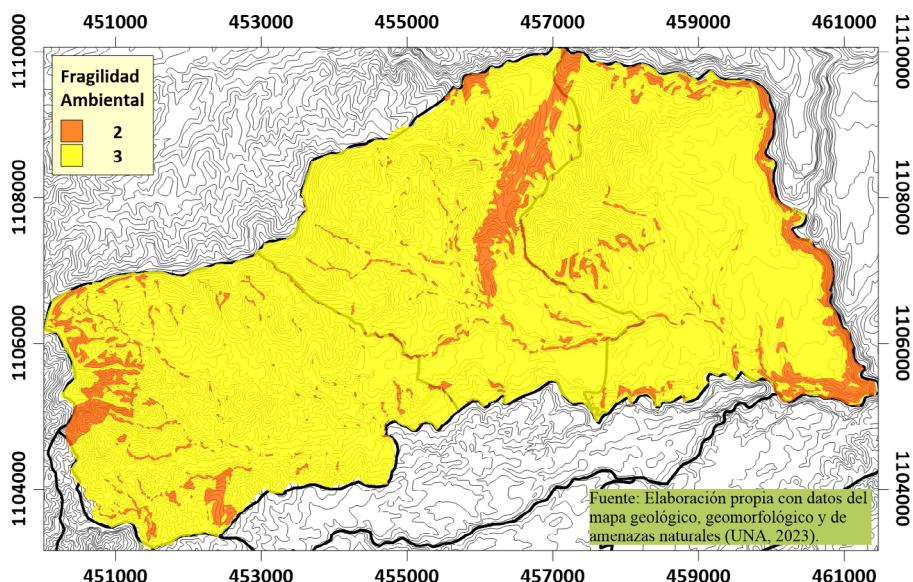
Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
MFA	Estas zonas presentan un acuífero confinado, rocas poco fracturadas. La vulnerabilidad del acuífero baja, capa impermeable que lo recubre actúa como una barrera protectora ante posibles contaminaciones superficiales. Esta condición a su vez reduce la recarga natural del acuífero, explotación del recurso hídrico subterráneo suele realizarse mediante perforación de pozos a mayores profundidades.	Acuífero confinado compuesto por rocas poco fracturadas, tasa de infiltración y la capacidad de recarga por precipitación reducida. La menor circulación de agua en estas formaciones también implica un menor potencial de producción de agua. A pesar de tener una vulnerabilidad baja debido a la protección de la capa impermeable, el volumen de agua disponible es limitado, lo que requiere un manejo adecuado para evitar la sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo.	Estas zonas son más estables para el establecimiento de construcciones controladas o la ubicación de industrias, gracias a su menor vulnerabilidad geotécnica. Además, presentan un potencial de explotación de agua subterránea mediante pozos. La infraestructura en estas áreas podría incluir el establecimiento de gasolineras y actividades similares, debido a su estabilidad geológica. Además, la baja tasa de infiltración y la presencia de rocas poco fracturadas implican una menor posibilidad de contaminación por lixiviados, lo que hace de estas zonas un lugar adecuado para este tipo de actividades sin comprometer gravemente los recursos hídricos.

Fuente: Elaboración propia con datos de los mapas hidrogeológico (UNA, 2023).

Factor ESTLAD

El mapa resultante (Figura 6) identifica tres categorías principales de fragilidad geodinámica externa en el área de estudio: MFA (3) y AFA (2).

Figura 6. Factor estabilidad de ladera de los distritos de San Isidro, San José y Santa Eulalia



Fuente: [UNA \(2023\)](#)

Zonas AFA (2)

El 11,7 % corresponde a un factor de tipo Alto.

Zonas MFA (3)

El 88,27 % presenta un factor de estabilidad de laderas de tipo moderado.

Los resultados muestran que la mayoría del área presenta pendientes de moderadas a pronunciadas, compuestas principalmente por rocas, que están de mediana a altamente alteradas. Aunque no se han registrado deslizamientos significativos, la combinación de otros fenómenos disparadores, como lluvias intensas, sismos o el mal uso del suelo, puede generar deslizamientos, particularmente en las áreas de mayor pendiente.

Las limitantes y potencialidades de cada una de las zonas se pueden apreciar en la Tabla 5:

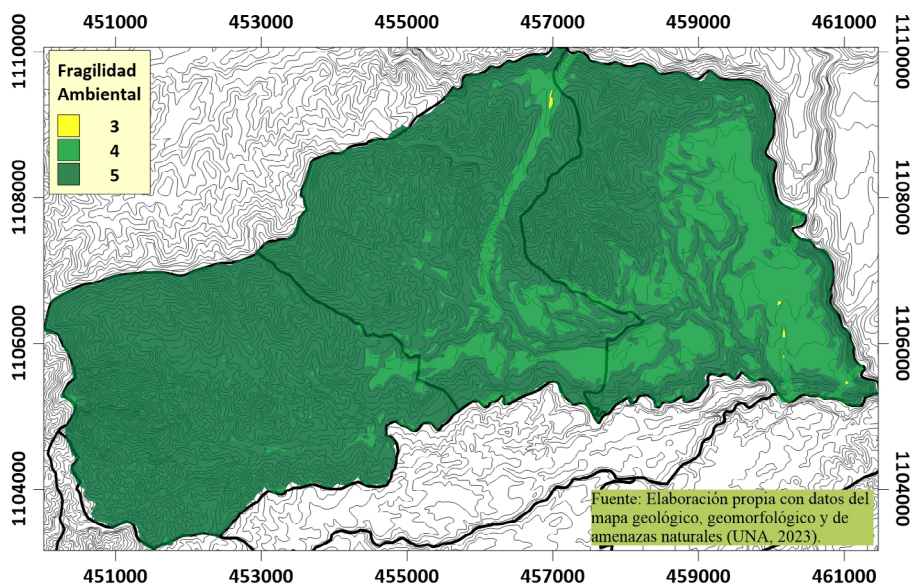
Tabla 5: Limitantes y potencialidades de uso de la tierra para el factor de estabilidad de ladera

Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
AFA	Áreas de alta pendiente y baja resistencia mecánica, propensas a deslizamientos.	Zonas poco aptas para el desarrollo de actividades humanas, debido a su alta susceptibilidad a la generación de deslizamientos.	Áreas aptas para la protección o recuperación forestal natural, donde la conservación del ecosistema y la restauración de la vegetación son fundamentales para mantener la estabilidad del terreno y los recursos hídricos.
MFA	Áreas de moderada pendiente y susceptibilidad al deslizamiento en sectores más puntuales, donde es posible el desarrollo de actividades humanas bajo criterios de manejo y control del uso del suelo, priorizando medidas de estabilización, drenaje adecuado y prácticas de conservación ambiental.	Requiere estabilización de taludes, en zonas donde se identifiquen signos de inestabilidad o antecedentes de movimientos en masa. Estas medidas pueden incluir la implementación de drenajes superficiales y subterráneos, muros de contención, reforestación con especies de raíz profunda y control del escurrimiento para reducir el riesgo de deslizamientos.	Áreas con medidas de estabilización, podrían desarrollar una variedad de proyectos antrópicos de forma controlada. Estos podrían incluir infraestructura liviana, caminos rurales, actividades agrícolas de bajo impacto o incluso edificaciones si se aplican correctamente las recomendaciones de diseño geotécnico para mitigar posibles riesgos asociados a la inestabilidad del terreno.

Fuente: Elaboración propia con datos de los mapas geológico, geomorfológico y de amenazas naturales (UNA, 2023)

Factor AMENAT
El mapa resultante (Figura 7) identifica tres categorías principales de fragilidad geodinámica externa en el área de estudio: MFA (3), BFA (4) y MBFA (5).

Figura 7. Factor amenazas naturales de los distritos de San Isidro, San José y Santa Eulalia



Fuente: [UNA \(2023\)](#).

Zonas MFA (3)

Se concentra en sectores planos con cauces profundos, en donde el riesgo aumenta levemente debido a la configuración geomorfológica y posibles procesos de concentración de escorrentía.

Zonas BFA (4)

El 17,92 % del área de estudio se clasifica dentro del factor bajo, especialmente en zonas aledañas a fallas neotectónicas y cauces donde pueden presentarse procesos de crecida durante lluvias extremas o eventos de ruptura superficial.

Zonas MBFA (5)

Predomina un 81,83 % del territorio, y esto se explica por la ausencia de actividad sísmica local relevante, la escasa influencia de eventos volcánicos, y las características del suelo, que reducen el riesgo de licuefacción. Las amenazas más destacables estarían relacionadas con

posibles inundaciones menores en áreas cercanas a ríos y quebradas, así como con la potencial reactivación de fallas geológicas importantes.

Las limitantes y potencialidades de cada una de las zonas se pueden apreciar en la Tabla 6:

Tabla 6: Limitantes y potencialidades de uso de la tierra para el factor de amenazas naturales

Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
MFA	Localizadas en proximidad a cauces de ríos, que presentan riesgo de inundación durante eventos de lluvias extraordinarias o prolongadas. Incluyen sectores asociados a trazas de fallas geológicas significativas, con posibilidad de ruptura superficial ante la ocurrencia de eventos sísmicos.	Se restringe la construcción sin la realización previa de estudios detallados de fallamiento geológico a escalas más precisas. Estas áreas pueden presentar un mayor potencial de inundación durante eventos de lluvias extraordinarias o prolongadas, por lo que requieren un manejo cuidadoso del uso del suelo y medidas de mitigación adecuadas.	Zonas apropiadas para la protección de quebradas y ríos, siendo fundamentales dentro del esquema de conservación y recarga hídrica. Se permite el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas de manera controlada, siempre que se respeten las zonas de protección y no se comprometan los procesos naturales de escorrentía, infiltración y calidad del agua. Estas áreas cumplen una función de sostenibilidad de los recursos hídricos del territorio.
BFA	Zonas con potencial sísmico local bajo. Estas áreas respetan las franjas de protección en torno a cauces de ríos y quebradas. Presentan baja probabilidad de licuefacción. Existe susceptibilidad a inundaciones y otros fenómenos derivados de eventos hidrometeorológicos extremos.	Zonas con mayor riesgo de ser afectadas por una ruptura superficial asociada a falla. Riesgo potencial de afectación respiratoria por caída de ceniza. Vulnerabilidad a sismos regionales. Construcciones deben cumplir con el Código Sísmico. Presentan mayor probabilidad de generación de deslizamientos, en pendiente pronunciada. Las áreas cercanas a cauces de ríos son susceptibles a inundaciones.	Zonas aptas para el establecimiento de construcciones controladas para la ubicación de industrias considerando factores geotécnicos y estabilidad del terreno. Presentan potencial para la explotación de agua subterránea mediante la perforación de pozos. Son viables para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas extensivas de forma controlada y con buenas prácticas de manejo del suelo y del agua. En los sectores montañosos, estas áreas son ideales para la conservación ambiental y procesos de recarga hídrica.

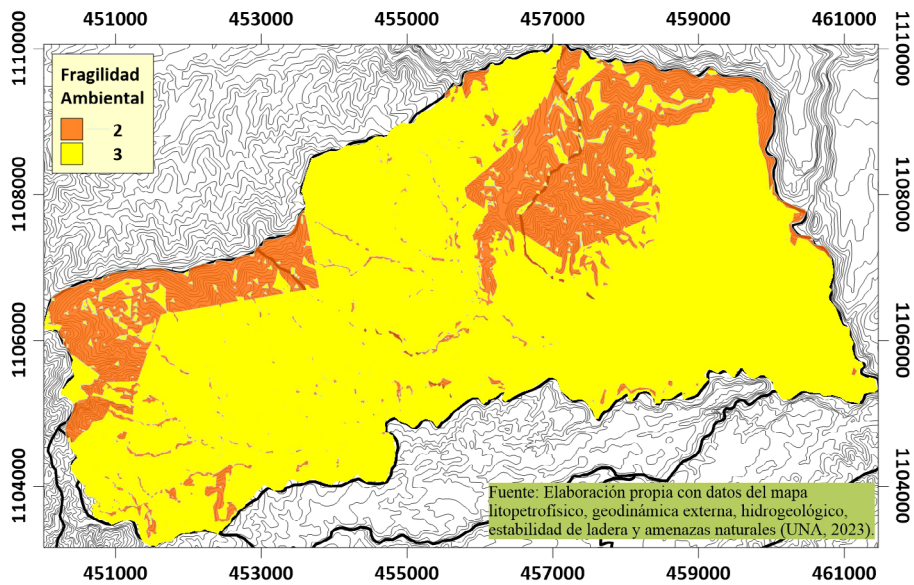
Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
MBFA	Zonas con muy bajo potencial sísmico local. Presentan baja probabilidad de ocurrencia de fenómenos de licuefacción.	Vulnerabilidad ante evento sísmico regional. Construcciones deben cumplir con Código Sísmico. Riesgo potencial de afectación respiratoria por ceniza. Ausencia de planificación y el aumento de densidad poblacional intensifica amenazas naturales. Incremento en la impermeabilización del terreno por desarrollo no controlado. Pueden generar inundaciones y disminuir la recarga hídrica del acuífero.	Áreas aptas para el establecimiento de construcciones controladas o la ubicación de industrias, con potencial para la explotación de agua subterránea mediante la perforación de pozos. Se permite el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas extensivas, siempre que se implementen medidas de control adecuadas. En los sectores montañosos, son ideales para la conservación ambiental y la recarga hídrica. Presentan baja probabilidad de ocurrencia de deslizamientos.

Fuente: Elaboración propia con datos de los mapas geológico, geomorfológico y de amenazas naturales (UNA, 2023)

Factor GEOINT

El mapa resultante (Figura 8) identifica tres categorías principales de fragilidad geodinámica externa en el área de estudio: MFA (3), BFA (4) y MBFA (5).

Figura 8. Factor geoaptitud integrada de los distritos de San Isidro, San José y Santa Eulalia



Fuente: [UNA \(2023\)](#)

Zonas AFA (2)

Por otro lado, el 9,64 % del área corresponde a zonas con una geoaptitud alta, caracterizadas por una mayor sensibilidad ambiental y geotécnica. Estas zonas requieren un manejo más estricto, particularmente en lo referente a la geodinámica externa, la estabilidad de laderas y la hidrogeología, por lo que cualquier intervención debe ser cuidadosamente evaluada y monitoreada.

Zonas MFA (3)

Los resultados obtenidos muestran que el 76,9 % del área de estudio presenta un valor IFA de tipo moderado, lo que indica que, aunque existen ciertas limitaciones en términos de geoaptitud, es factible permitir el desarrollo en estas zonas siempre que se apliquen medidas correctivas y preventivas adecuadas.

Las limitantes y potencialidades de cada una de las zonas se pueden apreciar en la Tabla 7:

Tabla 7: Limitantes y potencialidades de uso de la tierra para el factor de geoaptitud integrada

Categoría	Características	Limitaciones	Potencialidades
AFA	Zonas de alta a moderada pendiente, rocas muy meteorizadas y altamente fracturadas, susceptibilidad a inundaciones. Potencial hidrogeológico muy alto. Alineamientos y estructuras tectónicas, propensión a movimientos sísmicos. Estabilidad de laderas alto, vulnerabilidad a sismos..	Condiciones de pendiente, las lluvias y la presencia de suelos y rocas inestables crean propensión a deslizamientos, flujos de lodo e inestabilidad de taludes. Restricción para usos antrópicos debido a movimientos en masa. El desarrollo de infraestructuras o actividades humanas debería ser restringido.	Zonas ideales para la conservación y regeneración vegetal natural o asistida. Alto potencial para la recarga hídrica, lo que favorece la captación de fuentes de agua subterránea, como manantiales. Áreas para la protección de ecosistemas, la conservación de la biodiversidad y la regulación del ciclo del agua. Las actividades en estas zonas deberían centrarse en la restauración ecológica, la protección de los recursos hídricos y la prevención de la degradación del suelo. Estas áreas pueden ser zonas clave para la gestión ambiental y la sostenibilidad a largo plazo.
MFA	Zonas de pendiente moderada a baja, rocas meteorizadas y altamente fracturadas, áreas susceptibles a inundaciones. Potencial hidrogeológico entre alto y moderado, zonas aptas para la captación de agua subterránea. Ausencia de alineamientos y estructuras tectónicas, estabilidad de laderas de alta a moderada. Susceptibilidad a sismos regionales.	Zonas de pendiente con inestabilidad, riesgo moderado a deslizamientos o flujos de lodo, especialmente durante lluvias intensas o prolongadas. Áreas con limitaciones moderadas debido a factores geológicos, meteorológicos y de manejo del suelo, vulnerabilidad a amenazas naturales. Se requieren atención para la infraestructura y el uso de la tierra. Las medidas para la estabilización de taludes, el control de la escorrentía y el uso adecuado de las tierras, son esenciales para reducir el riesgo de inestabilidad. Estas zonas son aptas para usos controlados.	Con un manejo adecuado de la escorrentía y restricciones a la densidad en las zonas de alta pendiente, es posible desarrollar actividades urbanas de manera controlada y sostenible. Las intervenciones deben incluir medidas de estabilización de taludes, control de la erosión y drenaje eficiente para prevenir deslizamientos o daños a la infraestructura. Por otro lado, en las zonas de pendiente baja, donde el riesgo de inestabilidad es menor, se permite un desarrollo urbano de media y alta densidad, siempre que se sigan las normativas de planificación urbana y se garantice la infraestructura adecuada para el manejo del agua y la protección del medio ambiente. Es crucial que el desarrollo urbano se planifique considerando la capacidad de carga del terreno, el riesgo sísmico y las amenazas hidrometeorológicas, asegurando que las construcciones y actividades sean seguras y no incrementen el riesgo de desastres naturales.

Fuente: Elaboración propia con datos de los mapas litopetrofísico, geodinámica externa, hidrogeológico, estabilidad de ladera y amenazas naturales (UNA, 2023).

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la fragilidad ambiental del territorio mediante la aplicación del Índice de Fragilidad Ambiental (IFA), con énfasis en el componente de Geoaptitud Integrada del Terreno (GEOINT), desarrollado según la metodología establecida en el [Decreto Ejecutivo N.º 32967-MINAE \(2006\)](#). Su aplicación en los distritos rurales de Santa Eulalia, San José y San Isidro, pertenecientes al cantón de Atenas, posibilitó generar una espacialización detallada de la fragilidad ambiental, constituyendo un insumo técnico para la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial.

El análisis espacial evidenció patrones claramente diferenciados entre los tres distritos. En Santa Eulalia predominan las categorías de fragilidad alta y muy alta, asociadas a pendientes pronunciadas, materiales volcánicos fracturados y una densa red de drenaje; condiciones que incrementan la susceptibilidad a movimientos en masa y erosión acelerada. En San José, la fragilidad es principalmente moderada, con zonas de transición hacia alta fragilidad en sectores con procesos erosivos activos y morfologías irregulares. En contraste, San Isidro presenta amplias áreas con fragilidad baja a moderada, favorecidas por pendientes suaves y materiales sedimentarios más estables, lo que le confiere una mayor aptitud para usos agrícolas y asentamientos rurales controlados.

La integración multivariable del componente GEOINT permitió construir un indicador sintético que combina factores litológicos, morfométricos, geodinámicos, hidrogeológicos y de estabilidad de laderas. Este enfoque superó la valoración fragmentada tradicional del IFA, generando una representación espacial continua de la fragilidad que ofrece una lectura holística del territorio. Los resultados demuestran la utilidad de esta herramienta para establecer zonas de uso condicionado, manejo especial y restricción, facilitando la gestión diferenciada del suelo en función de su capacidad y limitaciones naturales.

Desde la perspectiva del ordenamiento territorial, la aplicación del IFA-GEOINT constituye una base metodológica para orientar la localización de actividades humanas en coherencia con la estructura física del territorio. Los mapas obtenidos permiten identificar áreas prioritarias para conservación y manejo sostenible, zonas aptas para el desarrollo agrícola o habitacional controlado, y sectores donde deben aplicarse

medidas de mitigación de riesgos. Esto representa un avance significativo para la planificación territorial rural del cantón de Atenas, cuyo Plan Regulador (1982) no incorporaba la variable ambiental, ni contemplaba las áreas rurales en su zonificación.

El enfoque GEOINT demostró ser replicable y adaptable a otros contextos cantonales, siempre que se disponga de información base adecuada y verificada mediante trabajo de campo. Su empleo facilita la toma de decisiones fundamentadas en evidencia geoespacial, fortaleciendo las capacidades técnicas de los gobiernos locales para la formulación de políticas de uso del suelo, la prevención de riesgos y la promoción de un desarrollo sostenible.

Entre las limitaciones del estudio se reconoce la necesidad de realizar análisis geotécnicos e hidrogeológicos a mayor escala (1:5 000 o superior) para aumentar la precisión espacial de los resultados, así como de mejorar la disponibilidad y homogeneidad de las capas temáticas de base. Aun con estas restricciones, la metodología aplicada ofrece una base científica robusta y operativa para integrar la variable ambiental en la gestión territorial, especialmente en zonas rurales donde la información geoespacial suele ser insuficiente.

En síntesis, la aplicación del IFA-GEOINT en los distritos rurales de Santa Eulalia, San José y San Isidro demuestra que la espacialización de la fragilidad ambiental es una herramienta estratégica para el ordenamiento territorial, al vincular la dinámica natural con los patrones de ocupación humana. Este enfoque aporta una perspectiva integral para la formulación de políticas públicas, la prevención del riesgo y la consolidación de un modelo de desarrollo cantonal sostenible y resiliente.

Finalmente, la metodología empleada demuestra ser replicable en otros contextos cantonales del país, siempre y cuando se cuente con los datos e información base en escalas de detalle y complementada con trabajo de campo, que permita la integración en el SIG, ofreciendo una base científica robusta para la construcción de modelos territoriales diferenciados, orientados al uso racional del suelo, la protección ambiental y la prevención del riesgo.

RECOMENDACIONES

Derivado del análisis integrado del territorio mediante la metodología aplicada, y fundamentado en los resultados obtenidos del índice GEOINT para los tres distritos rurales del cantón de Atenas, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a la gestión ambiental, la planificación territorial y la toma de decisiones institucionales:

- 1- Incorporar el GEOINT en los instrumentos de planificación territorial local, como el Plan Regulador y planes parciales de desarrollo, asegurando que las categorías de fragilidad ambiental sean consideradas como criterio técnico de base para la zonificación del uso del suelo.
- 2- Establecer zonas de restricción y manejo especial en áreas identificadas con fragilidad alta y muy alta, con énfasis en la prevención de riesgos asociados a deslizamientos, erosión severa, sedimentación activa y procesos de inestabilidad estructural del terreno.
- 3- Desarrollar políticas cantonales específicas para el manejo de áreas con fragilidad moderada, que permitan un uso condicionado del suelo, bajo principios de sostenibilidad, reforestación, conservación de corredores biológicos y limitación de actividades de alto impacto.
- 4- Diseñar e implementar sistemas de monitoreo ambiental continuo en las zonas de mayor susceptibilidad geoambiental, apoyados en tecnologías de información geoespacial y en la participación de actores comunitarios, con el fin de identificar, tempranamente, cambios en el comportamiento del paisaje y eventos de riesgo.
- 5- Promover la educación ambiental en las comunidades de los tres distritos rurales de Atenas y robustecer la formación técnica en temas de fragilidad territorial entre actores locales, especialmente funcionarios municipales, Comités Locales de Emergencias y productores agropecuarios, para fomentar una cultura de manejo responsable del territorio.
- 6- Fortalecer la articulación interinstitucional entre el gobierno local, la SETENA, el MINAE, la Comisión Nacional Atención de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) y las universidades públicas, a fin de consolidar los mecanismos de gestión compartida

del territorio, con base en evidencia científica y criterios técnico-ambientales como los establecidos por la metodología IFAS.

- 7- Replicar la metodología del IFA-GEOINT en los cantones vecinos con características rurales y pendientes similares, como herramienta estratégica para la gestión integral del territorio, la priorización de inversiones en infraestructura, y la planificación de nuevas áreas de expansión urbana y productiva.

Estas recomendaciones buscan contribuir a un modelo de desarrollo territorial ambientalmente responsable, técnica y jurídicamente fundamentado, que permita garantizar la sostenibilidad del cantón de Atenas frente a los desafíos socioambientales del presente y del futuro.

REFERENCIAS

- Alvarado, G. E., Morales, L., Montero, W., Climent, A., & Rojas, W. (1988). Aspectos sismológicos y morfotectónicos en el extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central de Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 9, 75-98.
- Asamblea Legislativa de Costa Rica. (1968). *Ley de Planificación Urbana. Ley N.º 4240*.
- Asamblea Legislativa de Costa Rica. (1969). *División Territorial Administrativa. Ley N.º 4366*.
- Asamblea Legislativa de Costa Rica. (1995). *Ley Orgánica del Ambiente. Ley N.º 7544*.
- Asamblea Legislativa de Costa Rica. (1998). *Ley de Orgánica del Ambiente. Ley N.º 7554*.
- Calderón, D., & Frey, K. (2017). El ordenamiento territorial para la gestión del riesgo de desastres en Colombia. *Territorios*, (36), 239-264.
- Castillo, V., & Alexander, H. (2022). Gestión del ordenamiento territorial sostenible en Latinoamérica: Una revisión sistemática de literatura. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(98), 417-434.
- Consejo Nacional de Rectores (CONARE). (2023). *Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible: Evolución del riesgo en el territorio: Implicaciones y desafíos para la política pública*. <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/8586>

- Constitución Política de la República de Costa Rica. (1949). *La Gaceta*.
- Covarrubias, F., & Cruz, M. (2019). La apropiación paisajística del territorio: Una disputa epistemológica. *Cinta de Moebio*, (64), 82-98.
- Denyer, P., Aguilar, T., & Alvarado, G. E. (2003). Geología de la hoja Baranca. *Revista Geológica de América Central*, (29), 105-125.
- Folch, R. (2003). *El territorio como sistema: Conceptos y herramientas de ordenación*. Diputación de Barcelona.
- Gudiño, M. (2015). El ordenamiento territorial como política de Estado. *Perspectiva Geográfica*, 20(1), 11-36.
- Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo (INVU). (1982). *Plan Regional de la Gran Área Metropolitana (PRUGAM)*. Oficina de Planificación de la Gran Área Metropolitana.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2006). Decreto Ejecutivo N.º 32967-MINAE: Manual de instrumentos técnicos para el proceso de evaluación de impacto ambiental (EIA). *Alcance N.º. 21 a la La Gaceta*, N.º 31.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2006). Decreto Ejecutivo N.º 44710-MINAE: Reglamento para la incorporación de la variable ambiental en los planes de ordenamiento territorial. *La Gaceta*, N.º 85.
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2025). Decreto Ejecutivo N.º 44901-MINAE: Reforma al Reglamento para la incorporación de la variable ambiental en planes de ordenamiento territorial. *La Gaceta*, N.º 31.
- Montero, W., Denyer, P., Barquero, R., Alvarado, G., Cowan, H., Macheffe, M., Haller, K., & Dart, R. (1998). Map and database of Quaternary faults and folds in Costa Rica and its offshore regions. U. S. Geological Survey.
- Montero, W., & Rojas, W. (2001). *Estudio de sismicidad y fallamiento activo del proyecto hidroeléctrico Tacaes*. Informe técnico. Universidad de Costa Rica – FUNDEVI.
- Ramírez, P., & Rodríguez, F. (2025). Determinación del índice de fragilidad ambiental por geoaptitud como herramienta para el ordenamiento territorial: Aplicación al cantón de Esparza, Puntarenas, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 74(1), 181-210.

- Rojas, M. (2011). *Neotectónica del extremo occidental de la Cordillera Volcánica Central: Falla Zarcero*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Rojas, V. (2013). *Relación entre procesos volcano-sedimentarios y el neotectonismo de la cuenca lacustrina de Palmares y San Ramón*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica].
- Universidad Nacional (UNA). (2023). *Estudios para la incorporación de la variable ambiental: Índice de Fragilidad Ambiental*. Informe de consultoría.