


Degradación del suelo y límites de la resiliencia vegetal en ecosistemas kársticos intervenidos por minería de calizas


Soil Degradation and Limits of Plant Resilience in Karst Ecosystems Disturbed by Limestone Mining

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.c.04.28>


Felipe Puc


 Universidad Americana de Europa, Quintana Roo, Cancún – México


 fp525419@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-9084-5581>

Daffry Puc

 Tecnológico Nacional de México, Ciudad de México – México

 daffry.puc@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0006-3328-0215>

Resumen

La minería de calizas en ecosistemas kársticos provoca alteraciones profundas en la estructura y funcionalidad del suelo, afectando directamente la capacidad de recuperación de la vegetación. El presente ensayo sostiene que la degradación edáfica constituye el principal límite para la resiliencia vegetal en paisajes post minería, debido a que compromete procesos esenciales como la infiltración hídrica, la retención de humedad, la disponibilidad de nutrientes y la formación de micrositios adecuados para el establecimiento de especies nativas. A partir de una revisión crítica de literatura científica, se analiza cómo las restricciones físicas del sustrato limitan la regeneración natural y favorecen comunidades vegetales simplificadas dominadas por especies tolerantes al estrés. Asimismo, se reflexiona sobre la manera en que la alteración de la relación suelo-vegetación reduce la diversidad funcional, interrumpe trayectorias sucesionales estables y compromete servicios ecosistémicos estratégicos. Finalmente, se plantea que los programas de restauración ecológica en ambientes kársticos deben priorizar la recuperación de la funcionalidad edáfica mediante estrategias activas, integrales y monitoreadas a largo plazo.

Palabras clave: *degradación edáfica; ecosistemas kársticos, minería de calizas, resiliencia ecológica, restauración ecológica.*

Abstract

Limestone mining in karst ecosystems causes profound alterations in soil structure and function, directly impacting the vegetation's capacity for recovery. This essay argues that soil degradation is the main limiting factor for plant resilience in post-mining landscapes, as it compromises essential processes such as water infiltration, moisture retention, nutrient availability, and the formation of microsites suitable for the establishment of native species. Based on a critical



review of scientific literature, the essay analyzes how physical substrate constraints limit natural regeneration and favor simplified plant communities dominated by stress-tolerant species. It also considers how the alteration of the soil-vegetation relationship reduces functional diversity, disrupts stable successional pathways, and compromises strategic ecosystem services. Finally, it proposes that ecological restoration programs in karst environments should prioritize the recovery of soil functionality through active, comprehensive, and long-term monitored strategies.

Keywords: *soil degradation; karst ecosystems, limestone mining, ecological resilience, ecological restoration.*

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas kársticos se distinguen por presentar suelos someros, alta permeabilidad, drenaje rápido y una estrecha interacción entre cobertura vegetal, infiltración hídrica y estabilidad edáfica (Ford & Williams, 2013). Estas características determinan un equilibrio ecológico particularmente frágil, en el que pequeñas alteraciones sobre el suelo o la vegetación pueden desencadenar cambios significativos en la dinámica hidrológica y en la estabilidad del sistema. Debido a ello, los ambientes kársticos son considerados altamente sensibles frente a perturbaciones intensivas de origen antrópico, especialmente aquellas asociadas a actividades extractivas. Entre estas, la minería de calizas representa una de las intervenciones más agresivas, ya que modifica drásticamente la superficie terrestre mediante la remoción de horizontes superficiales, la exposición de roca madre y la compactación del sustrato (Bautista et al., 2019).

En regiones tropicales, donde la relación entre suelo, agua y vegetación resulta fundamental para sostener la biodiversidad y la productividad biológica, los impactos derivados de la minería trascienden ampliamente la pérdida inmediata de cobertura vegetal. La alteración de las propiedades físicas y funcionales del suelo compromete procesos esenciales como la infiltración hídrica, la retención de humedad y el reciclaje natural de nutrientes, afectando así la capacidad de recuperación de los ecosistemas intervenidos (Carabassa et al., 2019). Sin embargo, a pesar de la complejidad de estos procesos, numerosos programas de recuperación ecológica continúan evaluando el éxito de la restauración a partir de indicadores visibles de revegetación, priorizando la presencia de cobertura vegetal sobre la recuperación integral de la funcionalidad edáfica. Esta perspectiva puede conducir a interpretaciones parciales del proceso de restauración, pues la permanencia de restricciones estructurales del suelo limita el establecimiento de comunidades vegetales estables y ecológicamente funcionales (Crouzeilles et al., 2017).

La problemática adquiere una dimensión aún más relevante en la Península de Yucatán, donde los acuíferos subterráneos poseen alta importancia ecológica, económica y social. En esta región, la conexión entre la superficie y el sistema hídrico subterráneo hace que la degradación del suelo asociada a actividades extractivas represente no solo un problema ambiental local, sino también un riesgo hidrológico regional. La pérdida de cobertura vegetal, la reducción de la infiltración efectiva y la exposición de materiales carbonatados pueden alterar

los procesos de recarga hídrica, incrementar la vulnerabilidad del agua subterránea y debilitar la capacidad natural del ecosistema para responder frente a sequías y otras perturbaciones ambientales. En consecuencia, la minería de calizas no solo transforma el paisaje visible, sino que también afecta procesos ecológicos menos evidentes, pero fundamentales para la sostenibilidad de estos territorios.

En este contexto, el presente ensayo sostiene como tesis central que la resiliencia vegetal en paisajes kársticos post minería depende menos de la recolonización espontánea de especies y más de la recuperación previa de la funcionalidad edáfica. Desde esta perspectiva, se analizan críticamente los límites de la regeneración natural, las barreras que impone la degradación física del suelo y las implicancias que ello tiene para los enfoques contemporáneos de restauración ecológica en ecosistemas kársticos intervenidos por actividades mineras.

METODOLOGÍA

El presente ensayo se desarrolla bajo un enfoque analítico, reflexivo y argumentativo, sustentado en la revisión crítica de literatura científica relacionada con la degradación del suelo, la ecofisiología vegetal, la resiliencia ecosistémica, la minería de calizas y la restauración ecológica en sistemas kársticos tropicales. La información revisada permite comprender las principales problemáticas asociadas a la alteración de la funcionalidad edáfica y sus efectos sobre la recuperación de la vegetación en ecosistemas intervenidos.

A partir de la evidencia científica consultada, se contrastan diferentes enfoques sobre resiliencia ecológica, regeneración natural y restauración post minera, identificando coincidencias, limitaciones y debates presentes en la literatura especializada. De esta manera, el ensayo construye una interpretación crítica e integradora orientada a analizar la relación entre degradación del suelo y resiliencia vegetal en paisajes kársticos afectados por minería de calizas.

DESARROLLO

Degradación física del suelo en paisajes kársticos post minería

La extracción de calizas altera severamente las propiedades físicas del suelo, incrementando la densidad aparente, reduciendo la porosidad y disminuyendo la capacidad de retención hídrica (Kozłowski, 1999; Bautista et al., 2019). En ecosistemas donde el suelo ya es naturalmente delgado y discontinuo, estas modificaciones adquieren una gravedad aún mayor, debido a que afectan directamente los procesos que sostienen la estabilidad ecológica y la regeneración vegetal.

La degradación física del suelo no implica únicamente pérdida material, sino también deterioro funcional. Un sustrato compactado restringe el crecimiento radicular, dificulta la infiltración homogénea del agua y limita la actividad biológica responsable del reciclaje de nutrientes (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2021). Como consecuencia, disminuye la productividad primaria y se ralentizan los procesos sucesionales, dificultando la recuperación natural de las comunidades vegetales.

Desde una perspectiva ecológica, el suelo puede entenderse como una infraestructura viva que sostiene las relaciones entre agua, nutrientes y vegetación. Cuando esa infraestructura se degrada, el ecosistema enfrenta barreras persistentes que no pueden resolverse únicamente mediante siembra o revegetación superficial, ya que la pérdida de funcionalidad edáfica condiciona la estabilidad del proceso de restauración.

Contexto regional: Península de Yucatán y presión extractiva

La Península de Yucatán concentra extensas formaciones calcáreas aprovechadas históricamente para construcción, industria cementera y expansión urbana. El crecimiento turístico y urbano en Quintana Roo y Yucatán ha incrementado demanda de materiales pétreos, intensificando extracción de calizas en zonas ecológicamente sensibles.

En estos territorios, la delgadez del suelo y la conexión entre superficie y acuífero subterráneo incrementan los riesgos derivados de disturbios extractivos. La pérdida de vegetación y materia orgánica reduce capacidad de amortiguamiento frente a sequías estacionales y eventos extremos.

Ello implica que la restauración post minera en Yucatán no constituye solo un problema paisajístico, sino un asunto estratégico de sostenibilidad territorial.

Efectos sobre cobertura y diversidad vegetal

La vegetación que recoloniza áreas degradadas suele estar dominada por especies pioneras tolerantes al estrés hídrico y restricciones nutricionales (Marroquín-Castillo et al., 2016; Quinto-Mosquera et al., 2022). Aunque estas especies cumplen funciones iniciales relevantes, no garantizan recuperación integral del ecosistema.

La simplificación florística reduce estratificación vertical, disponibilidad de hábitats y estabilidad trófica. Asimismo, limita servicios ecosistémicos como regulación microclimática, captura de carbono y conservación de biodiversidad (Chazdon & Guariguata, 2016).

Evaluar recuperación únicamente mediante presencia de cobertura vegetal puede conducir a diagnósticos optimistas pero incompletos. La resiliencia verdadera exige comunidades funcionalmente diversas y no solo vegetación visible.

Relación suelo-vegetación y resiliencia ecosistémica

La resiliencia ecológica se entiende como la capacidad del sistema para absorber perturbaciones y reorganizarse sin perder funciones esenciales (Holling, 1973). En ambientes kársticos post minería, dicha capacidad depende de la interacción entre estructura del suelo, disponibilidad hídrica y respuesta adaptativa de la vegetación (Guerra-Martínez et al., 2020).

Cuando persisten compactación, erosión o déficit hídrico, la sucesión ecológica tiende a estancarse. El suelo actúa como filtro ambiental que favorece pocas especies tolerantes y excluye comunidades más complejas.

Esto permite comprender por qué muchos sitios aparentan recuperación parcial, aunque mantienen fragilidad ecológica elevada frente a nuevas perturbaciones.

Debate contemporáneo: restauración pasiva versus restauración activa

Uno de los debates centrales en ecología aplicada consiste en determinar si basta excluir el disturbio para permitir regeneración natural o si se requieren intervenciones activas. En sistemas con degradación moderada, la restauración pasiva puede resultar eficaz y económicamente viable (Chazdon & Guariguata, 2016).

No obstante, en paisajes kársticos severamente alterados por minería, las restricciones físicas del sustrato suelen impedir trayectorias sucesionales espontáneas. En estos contextos, la restauración activa se vuelve necesaria mediante:

- incorporación de materia orgánica,
- descompactación localizada,
- construcción de microrelieves para retención de humedad,
- inoculación microbiológica,
- uso estratégico de especies nativas facilitadoras.

Estas acciones no sustituyen la sucesión natural, sino que restablecen condiciones mínimas para su reactivación (Márquez-Huitzil et al., 2022).

Experiencias internacionales comparadas

Diversos estudios en Brasil, Colombia, España e India muestran patrones semejantes en áreas mineras instaladas sobre sustratos frágiles: compactación persistente, baja regeneración espontánea y comunidades simplificadas.

En regiones mediterráneas, se ha documentado que la revegetación sin restauración del suelo produce coberturas inestables susceptibles a sequías prolongadas. En zonas tropicales húmedas, la falta de materia orgánica limita establecimiento de especies tardías.

Estas experiencias sugieren que la restauración exitosa depende menos del clima regional y más del restablecimiento de procesos edáficos básicos.

Implicancias para política pública y gestión sostenible

La degradación edáfica derivada de minería de calizas no constituye solo un problema ecológico, sino también social y territorial. La pérdida de funcionalidad del suelo compromete recarga hídrica, estabilidad paisajística y oportunidades productivas futuras.

Por ello, los programas de cierre minero deben superar enfoques centrados en revegetación superficial. Se requiere incorporar indicadores obligatorios de:

- calidad física del suelo,
- capacidad de infiltración,

- diversidad funcional vegetal,
- estabilidad ecosistémica,
- monitoreo mínimo de cinco a diez años.

Asimismo, la gestión pública necesita fortalecer exigencias regulatorias orientadas a restauración real y no únicamente mitigación estética del impacto.

La evidencia revisada demuestra que en ecosistemas kársticos la recuperación ecológica depende de procesos subterráneos frecuentemente invisibles para evaluaciones convencionales. Mientras el debate público suele centrarse en número de árboles plantados o cobertura visible, la literatura demuestra que sin suelo funcional la revegetación posee alta fragilidad (Carabassa et al., 2019).

Esto obliga a replantear los criterios clásicos de éxito en restauración. Un paisaje verde no necesariamente representa un ecosistema resiliente, ya que puede encubrir sistemas simplificados y vulnerables a nuevas perturbaciones (Holling, 1973). En este sentido, la restauración ecológica en contextos mineros debe migrar desde enfoques ornamentales hacia enfoques funcionales, donde el suelo recupere su papel como infraestructura ecológica primaria.

CONCLUSIÓN

La minería de calizas en ecosistemas kársticos genera impactos que trascienden la remoción superficial del terreno, pues compromete la base edáfica que sostiene la resiliencia vegetal. La evidencia disponible permite afirmar que la regeneración espontánea suele ser limitada cuando persisten restricciones físicas del sustrato.

Asimismo, la cobertura vegetal no puede asumirse como sinónimo de restauración ecológica, especialmente cuando predominan comunidades simplificadas y con baja diversidad funcional.

En consecuencia, los programas de recuperación deben situar la restauración del suelo como condición estratégica previa para trayectorias sucesionales más estables y sostenibles. En ecosistemas kársticos tropicales, sin suelo funcional, la resiliencia vegetal difícilmente puede consolidarse a largo plazo.

Rol de contribución

Felipe Puc: Conceptualización, investigación, redacción original, revisión y edición.

Daffry Puc: Investigación, curación bibliográfica, revisión y edición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bautista, F., Batllori-Sampedro, E., & Palacio-Prieto, J. L. (2019). Soil degradation and karst landscapes in the Yucatán Peninsula. *Catena*, 182, 104118. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104118>
- Carabassa, V., Ortiz, O., & Alcañiz, J. M. (2019). RESTOQUARRY: Indicators for self-evaluation of ecological restoration in open-pit mines. *Ecological Indicators*, 102, 437-445. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.001>

- Chazdon, R. L., & Guariguata, M. R. (2016). Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: Prospects and challenges. *Biotropica*, 48(6), 716–730. <https://doi.org/10.1111/btp.12381>
- Crouzeilles, R., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., Lindenmayer, D. B., Sansevero, J. B. B., Monteiro, L., Iribarrem, A., Latawiec, A. E., & Strassburg, B. B. N. (2017). Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science advances*, 3(11), e1701345. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701345>
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (2013). *Karst hydrogeology and geomorphology* (2nd ed.). Wiley.
- Guerra-Martínez, F., García-Romero, A., & Martínez-Morales, M. A. (2020). Evaluación de la resiliencia ecológica de los bosques tropicales secos: una aproximación multiescalar. *Madera y Bosques*, 26(3), 301–318. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2631983>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Kozłowski, T. T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596–619. <https://doi.org/10.1080/02827589908540825>
- Marroquín-Castillo, J., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O., Mata-Balderas, J., & Collantes Chávez-Costa, A. (2016). Composición florística y diversidad de un área restaurada post-minería en el matorral espinoso tamaulipeco. *Polibotánica*, (42), 1-17. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.42.1>
- Márquez-Huitzil, R., Martínez-Garza, C., & Osorio Beristain, M. (2022). Adoptar los objetivos de la restauración ecológica como meta crucial al mitigar desechos mineros: una propuesta metodológica. *Acta botánica mexicana*, (129). <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.2019>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *World reference base for soil resources 2021*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/world-reference-base/en/>
- Quinto-Mosquera, H., Ayala-Vivas, G., & Gutiérrez Mosquera, H. (2022). Contenido de nutrientes, acidez y textura del suelo en áreas degradadas por la minería en el Chocó biogeográfico. *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 46(179), 514-528. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9177148>