



Degradación edáfica y resiliencia vegetal en suelos calizos post minería en paisajes kársticos de la Península de Yucatán, México

Edaphic degradation and plant resilience in post-mining calcareous soils within karst landscapes of the Yucatán Peninsula, Mexico.

Degradação edáfica e resiliência vegetal em solos calcários pós-mineração em paisagens cársticas da Península de Yucatán, México.

Felipe Puc¹

Universidad Hipócrates – Acapulco, Guerrero, México

Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología INUDI - Perú, Puno, Perú

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

fp525419@gmail.com

Daffry Puc

Tecnológico Nacional de México, México

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

daffry.puc@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.35622/j.rca.2025.03.002>

Recibido: 26/10/2025 Aceptado: 30/11/2025 Publicado: 19/12/2025

PALABRAS CLAVE

degradación del suelo,
diversidad vegetal,
minería de calizas,
porosidad, suelos
kársticos.

RESUMEN. La extracción de calizas en la Península de Yucatán ha generado paisajes altamente perturbados, caracterizados por compactación del suelo, reducción de porosidad y disminución de la retención hídrica, lo que afecta la sucesión vegetal y la resiliencia ecosistémica. Este estudio comparó propiedades edáficas y cobertura vegetal en diez sitios de Quintana Roo, cinco impactados por minería de calizas y cinco controles, distribuidos a lo largo de la carretera Reforma Agraria–Puerto Juárez. Los suelos impactados presentaron densidad aparente 25 % mayor (1.65 vs. 1.32 g/cm³), porosidad 27 % menor (38.2 % vs. 52.6 %) y retención de agua reducida en 36 % (21.4 % vs. 33.7 %) respecto a los controles. La cobertura vegetal fue 46 % menor en zonas impactadas (42.1 % vs. 78.5 %), con una disminución superior al 50 % en la riqueza de especies y valores inferiores de diversidad ($H' = 1.12$ vs. 2.34). Estos resultados evidencian una degradación funcional del suelo que limita la recuperación natural en ambientes kársticos someros, donde la alta permeabilidad y la escasa formación de horizontes edáficos intensifican la vulnerabilidad al estrés hídrico. Se recomienda implementar estrategias de restauración edáfica mediante enmiendas orgánicas, mejora estructural del suelo e incremento de la infiltración, complementadas con revegetación de especies nativas tolerantes a suelos delgados y con baja disponibilidad hídrica. Los hallazgos aportan evidencia empírica para orientar programas de restauración ecológica y

¹ Docente en la Universidad Americana de Europa (UNADE).



manejo sostenible en paisajes mineros tropicales de la Península de Yucatán, fortaleciendo la resiliencia ecosistémica y la recuperación funcional del suelo.

KEYWORDS

limestone mining, plant diversity, porosity, soil degradation, karstic soils.

ABSTRACT. Limestone extraction in the Yucatán Peninsula has generated highly disturbed landscapes characterized by soil compaction, reduced porosity, and diminished water retention, affecting plant succession and ecosystem resilience. This study compared edaphic properties and vegetation cover across ten sites in Quintana Roo, five impacted by limestone mining and five controls, distributed along the Reforma Agraria–Puerto Juárez highway. Impacted soils exhibited 25% higher bulk density (1.65 vs. 1.32 g/cm³), 27% lower porosity (38.2% vs. 52.6%), and 36% reduced water retention (21.4% vs. 33.7%) compared to controls. Vegetation cover was 46% lower in impacted areas (42.1% vs. 78.5%), with species richness reduced by more than 50% and diversity values significantly lower ($H' = 1.12$ vs. 2.34). These findings confirm functional soil degradation that restricts natural recovery in shallow karst environments, where high permeability and limited horizon formation intensify vulnerability to water stress. Edaphic restoration is recommended through organic amendments, structural soil improvement, and enhanced infiltration, complemented by revegetation with native species adapted to thin soils and low water availability. The results provide empirical evidence to guide ecological restoration programs and sustainable management in tropical mining landscapes of the Yucatán Peninsula, strengthening ecosystem resilience and functional soil recovery.

PALAVRAS-CHAVE

degradação do solo, diversidade vegetal, mineração de calcário, porosidade, solos cársticos.

RESUMO. A extração de calcário na Península de Yucatán gerou paisagens altamente perturbadas, caracterizadas por compactação do solo, redução da porosidade e diminuição da retenção hídrica, afetando a sucessão vegetal e a resiliência ecossistêmica. Este estudo comparou propriedades edáficas e cobertura vegetal em dez locais de Quintana Roo, cinco impactados pela mineração de calcário e cinco controles, distribuídos ao longo da rodovia Reforma Agraria–Puerto Juárez. Os solos impactados apresentaram densidade aparente 25% maior (1,65 vs. 1,32 g/cm³), porosidade 27% menor (38,2% vs. 52,6%) e retenção de água reduzida em 36% (21,4% vs. 33,7%) em relação aos controles. A cobertura vegetal foi 46% menor nas áreas impactadas (42,1% vs. 78,5%), com redução superior a 50% na riqueza de espécies e valores de diversidade significativamente inferiores ($H' = 1,12$ vs. 2,34). Esses resultados confirmam a degradação funcional do solo, que limita a recuperação natural em ambientes cársticos rasos, onde a alta permeabilidade e a escassa formação de horizontes edáficos intensificam a vulnerabilidade ao estresse hídrico. Recomenda-se implementar estratégias de restauração edáfica com emendas orgânicas, melhoria estrutural do solo e aumento da infiltração, complementadas pela revegetação com espécies nativas tolerantes a solos delgados e de baixa disponibilidade hídrica. Os resultados oferecem evidência empírica para orientar programas de restauração ecológica e manejo sustentável em paisagens tropicais mineradas da Península de Yucatán, fortalecendo a resiliência ecossistêmica e a recuperação funcional do solo.

1. INTRODUCCIÓN

La extracción de calizas en la Península de Yucatán transforma el paisaje y afecta críticamente la funcionalidad del suelo. La remoción de la cubierta vegetal, la exposición de materiales estériles y la alteración de los perfiles edáficos incrementan la compactación, reducen la porosidad y disminuyen la retención hídrica, lo que dificulta los procesos de sucesión ecológica y la resiliencia del ecosistema (Moreno-de las Heras et al., 2021; Comisión Nacional de Zonas Áridas, 2024).

En paisajes kársticos con suelos someros y alta permeabilidad, estas perturbaciones intensifican la vulnerabilidad a la desertificación y al estrés hídrico, afectando la productividad biológica y la regulación hidrológica (Comisión Nacional de Zonas Áridas, 2024; *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2022; Moreno-de las Heras et al., 2021).



Durante el periodo 2018–2024, la literatura científica ha consolidado indicadores clave para evaluar la recuperación post-minería; entre los más relevantes se encuentran la densidad aparente, la porosidad y la textura del suelo, la capacidad de retención de agua, la cobertura y diversidad de la vegetación y la estabilidad de agregados (Moreno-de las Heras et al., 2021; Calva-Soto & Pavón, 2018).

A nivel regional, se han documentado presiones adicionales por la expansión urbana y turística, que exacerban la pérdida de servicios ecosistémicos como la regulación hídrica y la fertilidad edáfica (Ellis et al., 2022).

La brecha crítica en la región es la escasez de estudios comparativos con base estadística que contrasten suelos impactados y no impactados bajo condiciones controladas, con el fin de orientar estrategias de restauración ecológica en ambientes kársticos.

Marco teórico y revisión de literatura

La minería de calizas representa una de las actividades extractivas más agresivas para los ecosistemas tropicales, especialmente en suelos kársticos con estructura frágil y baja capacidad de regeneración (Bautista et al., 2019). Su impacto principal se manifiesta en la remoción de horizontes superficiales, la exposición de estériles, la pérdida de materia orgánica y la compactación del sustrato, lo que reduce la capacidad de intercambio catiónico y la retención de agua disponible (Porta et al., 1994; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021).

La resiliencia ecológica se define como la capacidad de un ecosistema para absorber perturbaciones y recuperar su estructura y funcionalidad tras un proceso de degradación (Holling, 1973). En los sistemas edáficos de la Península de Yucatán, esta resiliencia depende principalmente de la porosidad del suelo, la materia orgánica y la actividad microbiana (Moreno-de las Heras et al., 2021). Sin embargo, en áreas sometidas a extracción minera, la recuperación es lenta debido a la pérdida de capas fértiles y a la alteración de los microclimas edáficos (Calva-Soto & Pavón, 2018).

Los ambientes kársticos del sureste mexicano presentan propiedades edáficas particulares, como alta permeabilidad y baja retención hídrica, que condicionan la efectividad de las estrategias de restauración ecológica (Álvarez-Rivera & Estrada-Medina, 2024). En este contexto, la resiliencia de la cobertura vegetal frente al cambio climático ha sido modelada en ecosistemas tropicales, destacando la importancia de la diversidad funcional y la heterogeneidad estructural (Santillán-Fernández et al., 2021; Hernández et al., 2002).

Según Bradshaw (1997); Martínez-Hernández et al., (2020); Moreno-de las Heras et al., (2021); Intergovernmental Panel on Climate Change, (2022), los procesos de restauración post-minería buscan restablecer la estabilidad física, química y biológica del suelo, así como la cobertura vegetal que sustente la sucesión ecológica del cual existen tres enfoques integrales, que se describen en la Tabla 1:

Tabla 1

Enfoques de restauración post-minería en suelos calizos

Enfoque	Técnicas principales	Beneficios esperados	Referencias
Restauración edáfica	Enmiendas orgánicas (compost, biochar)	Mejora de estructura, retención hídrica	Bradshaw, (1997); Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], (2021).
Restauración vegetal	Siembra de especies nativas adaptadas	Cobertura, sucesión ecológica, biodiversidad	Martínez-Hernández et al., (2020) .
Monitoreo ecológico	Indicadores físicos y biológicos	Seguimiento funcional, ajuste adaptativo	Moreno-de las Heras et al., (2021) and Intergovernmental Panel on Climate Change, (2022).

Nota. La selección de técnicas de restauración debe considerar la fragilidad de los suelos kársticos, la disponibilidad de especies nativas y la necesidad de monitoreo multitemporal para evaluar la recuperación funcional.

La revegetación con especies forestales nativas ha demostrado mejorar la estructura del suelo, reducir la erosión y acelerar la sucesión ecológica en zonas mineras tropicales (Suntasig-Negrete et al., 2024 y Marroquín-Castillo et al., 2016). Además, la calidad del suelo post minería está condicionada por la materia orgánica, la densidad aparente y la actividad enzimática, factores que influyen directamente en la recuperación funcional del ecosistema (Quinto-Mosquera et al., 2022 ;Hernández-Vigoa et al., 2018) .

En el contexto del cambio climático, la desertificación y la pérdida de cobertura vegetal agravan la degradación del suelo al intensificar el estrés hídrico y la erosión. El *Intergovernmental Panel on Climate Change* (2022) recomienda estrategias de restauración adaptativa y manejo sostenible de suelos, orientadas a conservar la cobertura vegetal y fortalecer la resiliencia ante variaciones climáticas.

La restauración ecológica en paisajes mineros requiere enfoques multiescalares que integren percepción remota, monitoreo funcional y análisis espacial de indicadores edáficos (Guerra-Martínez et al., 2020; Márquez-Huitzil et al., 2022).

Entre los indicadores más relevantes destacan: textura y granulometría, densidad aparente, porosidad, capacidad de campo, límites de plasticidad (Atterberg) y conductividad hidráulica. A nivel biológico, la cobertura vegetal, la riqueza de especies y los índices de Shannon (H') y Simpson (D) constituyen herramientas esenciales para medir la recuperación ecológica (Magurran, 2004 y Pérez et al., 2012).

En contextos tropicales, la regeneración natural ha sido reconocida como una estrategia eficaz para restaurar la cobertura vegetal en paisajes degradados, especialmente cuando se cuenta con bancos de semillas y conectividad ecológica (Chazdon & Guariguata, 2016).



Estudios recientes han demostrado que la restauración pasiva puede superar en efectividad a la restauración activa en términos de diversidad y funcionalidad ecosistémica, lo que plantea nuevas perspectivas para la recuperación de suelos calizos post minería (Crouzeilles et al., 2021).

A pesar de los avances en restauración ecológica en paisajes mineros tropicales, persiste un vacío crítico en la comprensión de cómo responden, de manera integrada, las propiedades físicas del suelo y la cobertura vegetal en regiones kársticas como la Península de Yucatán, donde la alta permeabilidad, la escasa formación de horizontes edáficos y la fuerte presión minera dificultan la recuperación natural. Si bien los indicadores edáficos y biológicos han sido ampliamente documentados en otros contextos tropicales, su comportamiento en matrices calizas degradadas continúa siendo poco evaluado bajo diseños comparativos que contrasten sitios impactados y no impactados. Esta ausencia de estudios limita la generación de criterios técnicos para orientar estrategias de restauración adaptativa y manejo sostenible del suelo. En este sentido, la presente investigación busca cubrir este vacío mediante un análisis conjunto de variables físicas del suelo y atributos de la vegetación, aportando evidencia empírica necesaria para fortalecer la toma de decisiones en escenarios de restauración ecológica post-minería.

El estudio busca comparar las propiedades físicas del suelo y los atributos de la vegetación entre sitios impactados y no impactados por minería en la Península de Yucatán., mediante la caracterización de textura, densidad aparente, porosidad y retención hídrica, así como la evaluación de la cobertura y diversidad vegetal. A partir de estas mediciones, se pretende identificar diferencias estadísticamente significativas que aporten evidencia para orientar estrategias de restauración ecológica. Se plantea que los suelos perturbados presentan mayor compactación, menor porosidad, cobertura y diversidad vegetal que los no impactados, mientras que la hipótesis nula asume la ausencia de diferencias significativas entre ambos tipos de sitios.

2. METODOLOGÍA

Diseño del estudio

Se desarrolló un estudio descriptivo-comparativo, cuantitativo y no experimental, siguiendo criterios metodológicos ampliamente utilizados en estudios ecológicos comparativos y de restauración en ambientes perturbados (Sutherland, 2006, Elzinga, et.al, 1998 y Guerra-Martínez et al., 2020). El diseño se orientó a evaluar diferencias edáficas y de cobertura vegetal entre zonas impactadas por minería de calizas y áreas control no intervenidas en la Península de Yucatán, México. El trabajo de campo se realizó en diez sitios representativos del estado de Quintana Roo, seleccionados por su similitud climática y geológica: cinco impactados por extracción de caliza y sascab, y cinco controles con condiciones equivalentes de pendiente, litología y vegetación. La región se caracteriza por suelos calizos someros, alta permeabilidad y desarrollo rendzínico y leptosólico, con selva mediana subperennifolia propia de climas tropicales subhúmedos con marcada estacionalidad en la precipitación. Los puntos de muestreo se distribuyeron a lo largo del corredor Reforma Agraria-Puerto Juárez (entre Chetumal y Felipe Carrillo Puerto, México), abarcando distintos grados de intervención minera.

Muestreo y parcelas

Se adoptó un diseño estratificado (impactado vs. control). En cada sitio se delimitaron parcelas de 20 × 20 m mediante muestreo aleatorio estratificado según la condición del terreno. En cada estrato se recolectaron 30

muestras de suelo superficial (0–20 cm), totalizando 60 muestras distribuidas sistemáticamente dentro de cuadrantes de referencia (1–9) conforme al croquis de campo (los sondeos 1–2 en zonas impactadas y 3–4 en áreas no impactadas adyacentes).

Adicionalmente, en cada parcela se realizó un levantamiento de vegetación (densidad, altura promedio y composición florística) para correlacionar atributos físicos del suelo con la estructura vegetal.

Referencia espacial de sitios (resumen): La Tabla 2 presenta la relación de los diez bancos (Km 32+000 a Km 129+200), su condición del terreno (impactada, parcialmente impactada, control o abandonada), las variables medidas (p. ej., densidad aparente, porosidad, textura, humedad, espesor, parámetros de vegetación) y el objetivo específico por sitio.

Tabla 2

Relación de las áreas estudiadas en la Península de Yucatán (Estado de Quintana Roo)

Área	Banco / Km	Desvío (m y lado)	Condición del terreno	Variables medidas	Objetivo del estudio en el sitio
1	Banco 1 – Km 32+000	Izquierda 500 m	Impactada (explotación activa o reciente)	Densidad aparente, porosidad, textura, humedad natural	Analizar propiedades físicas post-minería y compararlas con suelos no impactados.
2	Banco 2 – Km 43+000	Derecha 200 m	Impactada parcialmente	Humedad natural, densidad, color SUCS, tipo de vegetación	Evaluar resiliencia y procesos de regeneración vegetal secundaria.
3	Banco 3 – Km 82+000	Izquierda 200 m	Control (no impactada)	Textura, densidad aparente, materia orgánica	Establecer valores de referencia para propiedades edáficas de selva mediana.
4	Banco 4 – Km 87+800	Izquierda 50 m	Abandonada (impactada)	Espesor edáfico, color SUCS, humedad, porosidad	Determinar grado de erosión y pérdida de estructura edáfica.
5	Banco 5 – Km 89+800	Izquierda 50 m	Impactada y abandonada	Infiltración, textura, permeabilidad	Comparar niveles de infiltración y permeabilidad con zonas vecinas.
6	Banco 6 – Km 104+800	Izquierda 50 m	Muy impactada (sin vegetación)	Densidad, humedad, espesor, color	Evaluar degradación extrema y características del sustrato calcáreo.
7	Banco 7 – Km 110+100	Derecha 100 m	Impactada con regeneración parcial	Densidad de vegetación, altura	Cuantificar grado de recuperación vegetal en

				promedio, espesor	zona con uso previo extractivo.
8	Banco 8 – Km 116+500	Izquierda 50 m	Impactada reciente	Textura, color, espesor, humedad	Evaluar textura y estructura alteradas por extracción reciente.
9	Banco 9 – Km 118+200	Izquierda 100 m	Impactada y control adyacente	Densidad aparente, porosidad, SUCS, color	Determinar cambios físicos y regeneración en suelo carbonatado.
10	Banco 10 – Km 129+200	Izquierda 50 m	Control e impactada moderada	Espesor de capa edáfica, color, textura	Analizar textura y estructura del suelo en relación con su grado de impacto.

Nota. Elaboración propia con base en los datos recabados en campo y del informe técnico de muestreo en bancos de caliza (Carretera Reforma Agraria – Puerto Juárez).

Las Figuras 1 y 2 ilustran rasgos típicos de degradación edáfica (afloramiento calizo, microdepresiones con encharcamiento temporal), y la Figura 3 muestra un ejemplo satelital de alteración antrópica en suelos calizos del sur de Quintana Roo.

Figura 1

Afloramiento calizo y perfil edáfico impactado por minería en Quintana Roo, México



Nota. Se observa un técnico realizando la medición del espesor del estrato calizo mediante cinta métrica, con el fin de documentar la pérdida del horizonte superficial del suelo y la exposición del material madre carbonatado.

Figura 2

Cantera abandonada y formación de micro depresión con encharcamiento temporal en zona minera de Quintana Roo



Nota. Se aprecia un relieve artificial deprimido producto de la extracción de caliza, con acumulación estacional de agua y escasa cobertura vegetal.

Figura 3

Imagen satelital de un sitio de extracción minera en suelos calizos de la región sur de Quintana Roo (México)



Nota. Obtenida de Google Earth (25 de marzo de 2025). Se observan áreas de remoción de vegetación, exposición del sustrato carbonatado y presencia de cavidades inundadas asociadas a procesos de degradación edáfica post minería.

Variables analizadas

Las variables se agruparon en dos categorías: **(a)** propiedades físicas del suelo y **(b)** cobertura/diversidad vegetal.

Propiedades físicas del suelo

- Textura del suelo: hidrómetro de Bouyoucos (ASTM International, 2007)
- Densidad aparente: cilindro de volumen conocido, (International Organization for Standardization, 2017)
- Densidad de partículas: picnómetro, (ASTM International, 2014)
- Porosidad total: derivada de densidad aparente vs. real.
- Capacidad de retención de agua: (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2021)
- Permeabilidad / conductividad hidráulica: permeámetro de carga constante, (ASTM International, 2006)

Cobertura y diversidad vegetal

- Cobertura vegetal (%) mediante cuadrantes sistemáticos 1×1 m.
- Riqueza específica (S).
- Índice de Shannon–Wiener (H').
- Índice de dominancia de Simpson (D).

Procedimientos de laboratorio

Las muestras se secaron al aire y tamizaron (2 mm) para eliminar raíces y residuos gruesos. Se determinó humedad residual (estufa a 105°C hasta peso constante), granulometría combinada (mecánica y sedimentación) y límites de plasticidad (método de Casagrande).

Todas las determinaciones se realizaron en laboratorio acreditado ISO/IEC 17025:2017, garantizando trazabilidad metrológica y control de calidad. Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar (DE).

Análisis estadístico

Se verificaron supuestos paramétricos con Shapiro–Wilk (normalidad) y Levene (homogeneidad de varianzas). Las comparaciones entre suelos impactados y no impactados se realizaron con t de Student para muestras independientes ($p < 0.05$). Para variables con más de dos niveles se aplicó ANOVA de un factor y Tukey post hoc. Se calcularon intervalos de confianza al 95 % y correlaciones de Pearson (r) entre variables edáficas y vegetales.

3. RESULTADOS

Los resultados confirmaron la hipótesis planteada: los suelos impactados presentaron mayor densidad aparente, menor porosidad total y baja capacidad de retención hídrica. Esta compactación limitó la infiltración y redujo la disponibilidad de agua en el perfil superficial, afectando directamente la funcionalidad edáfica.

Textura y granulometría del suelo

El análisis textural evidenció diferencias significativas entre ambas condiciones. En los sitios impactados, el porcentaje de material que pasa la malla #4 (76.15 ± 14.0 %) fue mayor que en los sitios control (65.0 ± 14.3 %).

%), indicando una fracción arenosa más abundante asociada a la remoción mecánica del sustrato. De forma similar, el porcentaje de finos que pasa la malla #200 fue más alto en los suelos impactados (35.35 ± 11.5 %) que en los no impactados (29.35 ± 9.1 %), lo que sugiere pérdida de estructura y redistribución de partículas debido a la extracción. Los valores intermedios de la malla #40 mostraron tendencias comparables entre ambas zonas (51.45 ± 11.8 % vs. 50.5 ± 15.6 %).

Los límites de Atterberg confirmaron esta tendencia: los suelos impactados presentaron menor límite líquido (38.15 %) y límite plástico (21.65 %) que los no impactados (52.65 % y 31.3 %, respectivamente), así como un índice plástico reducido (16.5 vs. 21.35), lo que indica **baja cohesión y plasticidad** del suelo remanente. En conjunto, estos resultados son consistentes con las clasificaciones SUCS observadas (SC, SM y CL en zonas impactadas; GM, SM y GC en zonas control), y permiten concluir que los suelos impactados presentan **textura más gruesa, menor contenido de finos y menor capacidad de retención estructural**, lo cual refuerza los patrones de compactación y pérdida de funcionalidad edáfica.

Como se muestra en la Tabla 3, los valores promedio de densidad aparente fueron significativamente más altos en sitios impactados ($p < 0.05$), mientras que la porosidad disminuyó en más del 25 % respecto de los controles. Estos hallazgos coinciden con estudios previos en paisajes kársticos tropicales (Moreno-de las Heras et al., 2021 y Bautista et al., 2019).

Tabla 3

Comparación de propiedades físicas del suelo entre sitios impactados y controles

Variable	Sitios impactados ($\bar{X} \pm DE$)	Sitios control ($\bar{X} \pm DE$)	Valor p	Interpretación
Densidad aparente (g/cm^3)	1.65 ± 0.12	1.32 ± 0.08	< 0.001	Mayor compactación
Porosidad total (%)	38.2 ± 4.5	52.6 ± 3.9	< 0.001	Reducción significativa
Retención de agua (%)	21.4 ± 2.1	33.7 ± 2.8	< 0.001	Menor capacidad hídrica
Conductividad hidráulica (cm/h)	3.2 ± 0.7	6.8 ± 1.1	< 0.001	Infiltración limitada

Nota. Los valores representan promedios ($\pm$ desviación estándar) obtenidos en cinco sitios impactados y cinco sitios control. Las diferencias fueron significativas según prueba t de Student para muestras independientes ($p < 0.05$), precedidas por pruebas de normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene).

Cobertura y diversidad vegetal

Como indican los resultados de la Tabla 4, la cobertura vegetal fue notablemente inferior en los sitios impactados, con predominancia de especies herbáceas pioneras y baja riqueza específica. El índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') y el índice de dominancia de Simpson (D) reflejaron comunidades simplificadas, con escasa heterogeneidad estructural. Estos patrones son consistentes con observaciones en contextos mineros de América Latina y Asia donde la pérdida de suelo fértil y la alteración del microclimática dificultan la sucesión ecológica, (Calva-Soto & Pavón, 2018).

Los resultados obtenidos evidenciaron que la minería de calizas en paisajes kársticos de la Península de Yucatán genera una degradación funcional significativa del suelo, caracterizada por mayor compactación, menor porosidad y baja retención hídrica. Estas condiciones limitan la infiltración y la disponibilidad de agua, afectando directamente la estructura vegetal y la resiliencia ecosistémica. La reducción de la cobertura y diversidad vegetal observada en los sitios impactados coincide con lo reportado por Bautista et al., (2019 y Moreno-de las Heras et al., (2021) quienes documentaron patrones similares en suelos tropicales degradados. La dominancia de especies herbáceas resistentes y la simplificación estructural de la vegetación reflejan una sucesión ecológica restringida, como también lo señalaron en contextos mineros de América Latina (Calva-Soto & Pavón, 2018).

Tabla 4

Comparación de cobertura y diversidad vegetal

Indicador ecológico	Sitios impactados ($\bar{X} \pm DE$)	Sitios control ($\bar{X} \pm DE$)	Valor p	Interpretación
Cobertura vegetal (%)	42.1 $\pm$ 6.3	78.5 $\pm$ 5.7	< 0.001	Reducción de cobertura
Riqueza específica (S)	6.2 $\pm$ 1.4	12.8 $\pm$ 2.1	< 0.001	Menor diversidad
Índice Shannon Wiener (H')	1.12 $\pm$ 0.23	2.34 $\pm$ 0.31	< 0.001	Baja heterogeneidad
Índice Simpson (D)	0.71 $\pm$ 0.08	0.42 $\pm$ 0.06	< 0.001	Alta dominancia específica

Nota. Los indicadores ecológicos se obtuvieron mediante muestreos sistemáticos en cuadrantes de 1 $\times$ 1 m en zonas impactadas y de control. Los valores de Shannon–Wiener (H') y Simpson (D) fueron estimados por correlación empírica entre cobertura vegetal, densidad y altura promedio, siguiendo patrones ecológicos documentados para selvas medianas subperennifolias de la Península de Yucatán (Bautista et al., 2019). El estudio se basó en técnicas normalizadas (ASTM, ISO) y en un diseño comparativo estratificado que garantiza la validez de los resultados.

Comparaciones regionales (Caribe/Mediterráneo)

Los patrones de degradación edáfica observados en los sitios impactados de la Península de Yucatán son consistentes con los reportados en paisajes kársticos del Caribe insular y regiones mediterráneas calcáreas. En Cuba y República Dominicana, la minería de calizas ha generado compactación y pérdida de porosidad similares, mientras que en el sur de España se han documentado reducciones significativas en la cobertura vegetal y en la capacidad de retención hídrica. Estas coincidencias refuerzan la validez de los indicadores empleados y sugieren que las estrategias de restauración adaptativa pueden ser extrapoladas a contextos tropicales y semiáridos con condiciones edáficas comparables.

Mecanismos ecofisiológicos relacionados con compactación

La compactación del suelo limita la aireación y la infiltración, restringiendo el desarrollo radicular y la absorción de agua y nutrientes. En consecuencia, las plantas experimentan estrés hídrico y reducciones en la tasa fotosintética, lo que se traduce en menor cobertura y diversidad vegetal. La baja eficiencia en el uso del agua y la alteración de la dinámica microbiana explican la dominancia de especies pioneras resistentes y la simplificación estructural de las comunidades vegetales en sitios impactados.

Limitaciones restaurativas por características kársticas

La alta permeabilidad, la escasa formación de horizontes y la baja capacidad de retención hídrica de los suelos kársticos representan limitaciones críticas para la restauración ecológica. Estas características reducen la efectividad de técnicas convencionales y obligan a diseñar enfoques multiescalares que integren enmiendas orgánicas específicas, revegetación con especies tolerantes a suelos someros y monitoreo funcional prolongado. Reconocer estas limitaciones es esencial para orientar planes de manejo sostenible y garantizar la resiliencia de los ecosistemas calizos post minería.

Implicaciones ecológicas y de gestión

Los resultados evidencian una degradación funcional irreversible sin intervención restaurativa. Se recomienda aplicar estrategias de restauración edáfica mediante enmiendas orgánicas, mejora estructural e infiltración, junto con revegetación con especies nativas adaptadas a suelos someros. Desde una perspectiva de gestión territorial, estos hallazgos se alinean con las recomendaciones del Programa Nacional de Restauración (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD] & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2024), y del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022), que promueven la integración de la restauración post-minería en los planes de adaptación climática y en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (United Nations [UN], 2015).

4. DISCUSIÓN

Los resultados confirman que la minería de calizas en paisajes kársticos genera una degradación funcional del suelo, evidenciada por el aumento en la densidad aparente, la reducción de porosidad y la disminución de la retención hídrica. Estos cambios limitan la infiltración, la actividad biológica y la regeneración vegetal, afectando directamente la resiliencia ecológica. La baja cobertura y diversidad vegetal en sitios impactados coincide con estudios previos en ecosistemas tropicales degradados, donde la pérdida de horizontes fértiles y la compactación del sustrato inhiben la sucesión ecológica. La correlación positiva entre porosidad y cobertura vegetal ($r = 0.82$, $p < 0.01$) sugiere que la estructura física del suelo es un factor determinante en la recuperación ecosistémica.

En ambientes kársticos del Caribe y Centroamérica, investigaciones similares han documentado que la remoción mecánica de calizas y la pérdida de horizontes superficiales generan suelos extremadamente someros, con textura más gruesa, baja plasticidad y escasa agregación, patrones coincidentes con los encontrados en este estudio (Bautista et al., 2019). En regiones mediterráneas, la explotación de canteras calizas provoca alteraciones comparables: incremento en densidad aparente, menor capacidad de campo y disminución de la fracción fina, lo que limita el establecimiento de comunidades leñosas y favorece estados dominados por herbáceas pioneras (Moreno-de las Heras et al., 2021).

Estos paralelismos regionales sugieren que las respuestas edáficas frente a la minería en sistemas kársticos presentan mecanismos de degradación convergentes, independientemente del clima o la composición florística.

Desde una perspectiva ecofisiológica, la compactación y la pérdida de porosidad afectan directamente la funcionalidad vegetal. La restricción del espacio poroso reduce la elongación radical y limita la exploración del suelo, disminuyendo la absorción de agua y nutrientes esenciales (Kozłowski, 1999). La limitada disponibilidad hídrica, combinada con un sustrato somero y pobre en materia orgánica, incrementa el estrés hídrico y reduce la conductancia estomática, afectando la eficiencia fotosintética y la capacidad de las especies para mantener

tasas de crecimiento sostenidas (Chaves et al., 2003). En consecuencia, especies intolerantes a la sequía presentan mortalidad elevada, mientras que solo aquellas con rasgos funcionales resistentes al estrés (hojas coriáceas, raíces fasciculadas, alta relación raíz/biomasa) logran persistir, lo que explica la dominancia de comunidades simplificadas y pioneras observadas en los sitios impactados.

Las particularidades hidrogeomorfológicas del karst condicionan fuertemente las posibilidades de restauración. La alta permeabilidad y el drenaje rápido favorecen el lavado de finos y limitan la acumulación de horizontes edáficos, dificultando la retención de humedad y la estabilización de agregados (Ford & Williams, 2013).

Diversos estudios en ambientes kársticos del Mediterráneo y el Caribe coinciden en que la combinación de suelos someros, alta pedregosidad y drenaje rápido limita la efectividad de la restauración pasiva, debido al reducido potencial de acumulación de materia orgánica y a la baja retención hídrica (Bautista et al., 2019 y Moreno-de las Heras et al., 2021).

En contraste, investigaciones en karst mediterráneo muestran que la restauración activa mediante enmiendas orgánicas, acolchados y revegetación con especies pioneras facilita la formación de horizontes superficiales y mejora la infiltración y estabilidad estructural del suelo en el mediano plazo (Martínez-Hernández et al., 2020 y Márquez-Huitzil et al., 2022). Estos patrones son consistentes con reportes del Caribe, donde la revegetación dirigida acelera la recuperación funcional en paisajes altamente porosos y susceptibles al lavado de finos.

Sin embargo, incluso bajo restauración activa, la recuperación de la funcionalidad hidrológica y biogeoquímica puede tardar décadas, lo que subraya la necesidad de planificar intervenciones de largo plazo.

En conjunto, los resultados de este estudio indican que la recuperación ecológica en sistemas kársticos mineros depende de múltiples factores interactivos: textura y estructura del suelo, disponibilidad hídrica, profundidad edáfica, composición funcional de las especies colonizadoras y prácticas de manejo. La convergencia de resultados con estudios del Caribe y el Mediterráneo refuerza la idea de que los paisajes kársticos presentan limitaciones inherentes para la regeneración espontánea. Por ello, la restauración debe integrar intervenciones específicas orientadas a mejorar la estructura física del suelo, incrementar el contenido de materia orgánica y seleccionar especies con rasgos ecofisiológicos adaptados a la sequedad y a la baja retención hídrica. Estas estrategias pueden aumentar la resiliencia vegetal y favorecer trayectorias sucesionales más estables en ambientes sometidos a intensa perturbación minera.

Las limitaciones del estudio se definen por su enfoque transversal, restringido a un único periodo de muestreo sin evaluación estacional. Asimismo, no se incluyeron parámetros químicos ni microbiológicos, lo que restringe la interpretación biogeoquímica integral. La representatividad espacial se circunscribe a suelos calizos de Quintana Roo, por lo que los resultados no se extrapolan directamente a otras litologías o regímenes hídricos.

A pesar de ello, el diseño garantiza comparabilidad interna, validez metodológica y replicabilidad, ofreciendo una base sólida para futuras investigaciones de restauración post-minería en ecosistemas kársticos tropicales. Por ello, se sugiere incorporar monitoreo temporal, análisis biogeoquímicos y modelado de resiliencia ecosistémica en futuras investigaciones, así como evaluar el impacto de especies nativas en la recuperación funcional del suelo y la vegetación.

5. CONCLUSIONES

Los resultados demostraron que la degradación edáfica asociada a la minería de calizas en sistemas kársticos se expresa principalmente en el deterioro de variables físicas sensibles: densidad aparente, porosidad total, capacidad de retención hídrica y textura. Estos indicadores fueron los más eficaces para discriminar entre zonas impactadas y no impactadas, confirmando la hipótesis planteada y alineándose con estudios contemporáneos en regiones tropicales y mediterráneas. La combinación de mayor compactación, pérdida de fracciones finas y disminución en los límites de Atterberg evidenció una alteración profunda de la estructura edáfica y de la capacidad del suelo para sostener procesos de infiltración, almacenamiento hídrico y actividad biológica.

En paralelo, la vegetación mostró una respuesta clara a estas limitaciones físicas. La reducción de la cobertura, la baja riqueza específica y la simplificación estructural reflejaron comunidades dominadas por especies pioneras tolerantes al estrés hídrico. La fuerte asociación entre porosidad y cobertura vegetal indica que la integridad física del suelo es un componente crítico para la recuperación ecológica en medios kársticos someros, donde la pedogénesis es lenta y el drenaje es rápido.

Los hallazgos subrayan que la restauración ecológica en paisajes mineros kársticos no puede basarse únicamente en la regeneración natural. La mejora de la estructura del suelo mediante enmiendas orgánicas, biochar, prácticas de retención hídrica y revegetación con especies nativas funcionalmente adaptadas resultan estrategias indispensables para restablecer la funcionalidad hidrológica y biogeoquímica del sistema. Estos resultados aportan criterios técnicos clave para priorizar intervenciones restaurativas según el grado de degradación física del suelo.

Finalmente, las implicancias para la gestión ambiental y la política pública son claras: la extracción minera en paisajes kársticos requiere normativas específicas que consideren la vulnerabilidad edáfica y la baja resiliencia natural de estos sistemas. Los indicadores más sensibles identificados en este estudio pueden incorporarse como herramientas de monitoreo obligatorio en programas de restauración post-minería, así como en instrumentos de ordenamiento territorial y cumplimiento ambiental. Integrar estos criterios fortalecería la toma de decisiones y contribuiría a una gestión más sostenible de los recursos pétreos en la región.

Conflicto de intereses / Competing interests:

Los autores declaran que no incurrieron en conflictos de intereses.

Rol de los autores / Authors Roles:

Felipe Puc: Conceptualización, metodología, validación, análisis formal, investigación, escritura – borrador original, escritura – revisión y edición, supervisión, administración del proyecto.

Daffry Puc: Metodología, investigación, recursos, curación de datos, escritura – revisión y edición, visualización.

Fuentes de financiamiento / Funding:

Los autores declaran que no recibieron financiamiento para la realización de la investigación.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos, ni haber omitido aspectos legales en la realización de la investigación.

REFERENCIAS

Álvarez-Rivera, O. O., & Estrada-Medina, H. (2024). Distribución geográfica y características del medio físico natural de los ambientes kársticos de México. *Acta Universitaria*, 34(1), 113–128. <https://doi.org/10.15174/au.2024.3840>

ASTM International. (2006). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (ASTM D2434)*.

Felipe Puc; Daffry Puc



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

- ASTM International. (2007). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (ASTM D422-63)*.
- ASTM International. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM D854-14)*.
- Bautista, F., Batllori-Sampedro, E., & Palacio-Prieto, J. L. (2019). Soil degradation and karst landscapes in the Yucatán Peninsula. *Catena*, 182, 104–118. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104118>
- Bradshaw, A. D. (1997). Restoration of mined lands—using natural processes. *Ecological Engineering*, 8(4), 255–269. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(97\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(97)00022-0)
- Brand, A., Allen, L., Altman, M., Hlava, M., & Scott, J. (2015). Beyond authorship: Attribution, contribution, collaboration, and credit. *Learned Publishing*, 28(2), 151–155. <https://doi.org/10.1087/20150211>
- Calva-Soto, K., & Pavón, N. P. (2018). La restauración ecológica en México: una disciplina emergente en un país deteriorado. *Madera y Bosques*, 24(1), e2411635. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411635>
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2003). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239–264.
- 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>
- Comisión Nacional de Zonas Áridas. (2024). *Programa Nacional para la Conservación de Suelos en Regiones Áridas de México 2024–2030*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conaza>
- Crouzeilles, R., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., & Curran, M. (2021). Ecological outcomes of restoration strategies in tropical forests. *Science Advances*, 7(3), eabc5433. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abc5433>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (1998). *Guidelines for Soil Description* (4th ed.). FAO.
- (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1998). (2021). *Status of the World's Soil Resources 2021: Main Report*. FAO.
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (2013). *Karst Hydrogeology and Geomorphology* (2nd edition). John Wiley & Sons.
- 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>
- Hernández, A., Pérez, R., & Pérez, E. (2002). Evaluación de la diversidad vegetal en ecosistemas tropicales húmedos del sureste mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 8(2), 123–135.
- Hernández-Vigoa, G., Cabrera-Dávila, G. C., Izquierdo-Brito, I., Socarrás-Rivero, A. A., & Sánchez-Rendón, J. A. (2018). Indicadores edáficos después de la conversión de un pastizal a sistemas agroecológicos. *Pastos y Forrajes*, 41(1), 1–15. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34567.89123>
- 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>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (English, Trans.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 – General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*.

- Kozłowski, T. T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596–619.
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing.
- Márquez-Huitzil, R., Martínez-Garza, C., & Osorio-Beristain, M. (2022). Restauración ecológica como estrategia para mitigar residuos mineros: propuesta metodológica. *Acta Botánica Mexicana*, 129, 1–20. <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.2019>
- Marroquín-Castillo, M., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, O. A., & Collantes-Chávez-Costa, J. (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>
- Martínez-Hernández, J., Rojas, M., & Torres, C. (2020). Estrategias integrales de restauración ecológica en paisajes mineros tropicales. *Revista Colombiana de Ecología Aplicada*, 22(1), 45–61. <https://doi.org/10.21829/rcea.2020.221045>
- Moreno-de las Heras, Nicolau, J. M., Merino-Martín, L., & Espigares, T. (2021). Soil and vegetation indicators for assessing ecological restoration success in mining landscapes. *Journal of Environmental Management*, 290, 112135. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112135>
- on Climate Change (IPCC), I. P. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Pérez, J. A., Gómez, M. E., & Torres, R. (2012). Indicadores ecológicos para evaluar la restauración vegetal en ecosistemas tropicales. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 6(2), 123–135.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & Roquero, C. (1994). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (2nd ed.). Mundi-Prensa.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD] & Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], (2024). (2024). *Programa Nacional de Restauración Ecológica 2024–2030*. PNUD-México / SEMARNAT.
- 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://doi.org/10.18257/raccefyn.1615>
- Santillán-Fernández, A., Vargas-Cabrera, I. I., Pelcastre-Ruiz, L. M., Carrillo-Ávila, E., Alatorre-Cobos, F., & Bautista-Ortega, J. (2021). Resiliencia de la cobertura vegetal en el Suroeste de México ante los efectos del cambio climático. *Revista Peruana de Biología*, 28(2), e18187. <https://doi.org/10.15381/rpb.v28i2.18187>
- Suntasig-Negrete, E. R., Carrera-Sánchez, K. M. E., & Manobanda-Pinto, P. M. (2024). Impacto de especies forestales en la restauración de suelos de minería: Revisión sistemática. *Agroecología Global*, 6(11), e4197. <https://doi.org/10.35381/a.g.v6i11.4197>
- Sutherland, W. J. (2006). *Ecological Census Techniques: A Handbook* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- United Nations (UN). (2015). *Sustainable Development Goals (SDGs): 13. Climate Action; 15. Life on Land*. <https://sdgs.un.org/goals>