UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

Evaluación de la restauración ecológica en una cantera de extracción de roca caliza en una Selva Baja Caducifolia en Tepetzingo, Morelos

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN BIOLOGÍA INTEGRATIVA DE LA BIODIVERSIDAD Y LA CONSERVACIÓN

PRESENTA:

BIÓL. AMALIA ALICIA PERDOMO RANGEL

DIRECTORA: DRA. PATRICIA VALENTINA CARRASCO CARBALLIDO

CUERNAVACA, MORELOS. **ABRIL, 2025**

Agradecimientos personales

Agradezco a Dios por sus tiempos perfectos, por guiar mi vida con sabiduría, llenar mi camino de propósito y darme la oportunidad de crecer tanto personal como profesionalmente.

A mi madre, Amalia, le agradezco profundamente por su amor y compañía constante, su valioso apoyo en la revisión de mi tesis y sus consejos durante este proceso.

A mi padre, Alberto, le agradezco profundamente por su amor incondicional, por ser una fuente constante de motivación y por inspirarme cada día a ser una mejor persona.

A mi novio, Luis Gustavo, por todo su amor y por su apoyo incondicional que ha sido mi mayor fortaleza, por siempre creer en mí, recordarme que soy capaz y motivarme a alcanzar cualquier meta.

Agradecimientos profesionales

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por la beca que me fue otorgada con el No. de CVU 1271829 de enero de 2023 a diciembre de 2024.

Al Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación (CIByC) por permitirme continuar con mi formación académica ingresando al posgrado en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación (MBIByC) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM).

Al CIByC por brindarme un espacio en el Laboratorio II de Biología Integrativa para hacer uso del horno de secado y balanza analítica.

Agradezco a la Dra. Valentina Carrasco por brindarme la oportunidad de trabajar bajo su dirección y por su apoyo en mi formación como Maestra en Ciencias.

Al Dr. Julio Campo, agradezco sus sabios consejos y orientación durante este proceso.

Al M. en C. Gabriel Flores, le expreso mi gratitud por su ayuda en la clasificación de las plantas y por su apoyo constante durante los viajes de campo.

A los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, la Dra. Paula Vargas y el Dr. Xavier López Medellín, les agradezco profundamente por su tiempo y valiosas observaciones para mejorar este trabajo.

Mi reconocimiento al Dr. Flavio Márquez por sus enseñanzas en el uso de STATISTICA y por su apoyo constante en el análisis de los resultados.

A los Doctores Antonio Guerrero, Daryl Cruz y Paula Vargas, les agradezco su guía en el análisis estadístico y la concepción del diseño experimental.

A los trabajadores de la empresa Cementos Moctezuma por apoyarnos en el trabajo de campo con fuerza de trabajo, así como en la logística del proyecto de investigación.

A la Biól. Mónica, gracias por su apoyo y compañía constante en los viajes de campo.

Finalmente, a todos aquellos que, de una u otra forma, contribuyeron a la culminación de este trabajo,

¡Muchas gracias!

Citar como:

Perdomo-Rangel, A.A. 2024. Evaluación de la restauración ecológica en una cantera de extracción de roca caliza en una Selva Baja Caducifolia en Tepetzingo, Morelos. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos, México. 93 pp.

Índice General

Índice de Tablas 6
Índice de Figuras 7
Índice de Anexos 8
Resumen 9
Abstract 10
Introducción 11
Antecedentes 11
Selva Baja Caducifolia 11
Minería 12
Sucesión Natural 13
Restauración Ecológica 14
Sitio de referencia 15
Atributos de la vegetación 15
Importancia de leguminosas y pioneras en ambientes perturbados 16
Fertilidad del suelo 17
Influencia de la estacionalidad en los suelos de SBC 17
Características de suelos afectados por minería 18
Justificación 21
Objetivo General 22
Objetivos Específicos 22
Hipótesis 22
Predicciones 22
Materiales y Métodos 23
Área de estudio 23
Diseño experimental 24
Análisis estadístico 27
Resultados 28
Estructura y Composición de especies leñosas 28
Desempeño en los Sitios Restaurados 30
Sobrevivencia por Especies 30
Análisis por Grupos 31
Caracterización de los Suelos 33
Variación Estacional 33
Efectos del cambio de uso del suelo y de los tratamientos de restauración ecológica. 34

Relación Planta-Suelo 42
Discusión 48
Estado sucesional de los sitios Restaurados 48
Composición de especies y desempeño 49
Implicaciones para estrategias de restauración 52
Limitaciones y futuras investigaciones 52
Propiedades del suelo 53
Variación estacional de las propiedades del suelo 54
Efectos del cambio de uso y la restauración en las propiedades del suelo 56
Efecto de las propiedades del suelo con la estructura, composición y desempeño de las plantas leñosas 65
Conclusiones 68
Consideraciones y recomendaciones sobre los sitios Restaurados 69
Anexos 72
Referencias Bibliográficas 76

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de los sitios muestreados. 23
Tabla 2. Abundancia de especies leñosas compartidas entre los sitios Restaurados y el Conservado clasificadas por grupo funcional (GF), hábito (H) y estado sucesional (ES) así como la familia a la que pertenecen. Datos obtenidos en temporada seca (marzo/2023) 29
Tabla 3. Estructura y composición de plantas leñosas en cada sitio. Se muestran la media y el error estándar, así como la mediana y los rangos intercuartílicos (IQR) junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney (U = 144, p < 0.001). Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios. Los cuatro sitios restaurados están agrupados bajo la categoría "Restaurados". 30
Tabla 4. Sobrevivencia de las especies leñosas más abundantes encontradas en los sitios Restaurados después de seis meses. Las especies están agrupadas por grupo funcional (GF), hábito (H) y estado sucesional (ES). Se presentan los resultados de la prueba exacta de Fisher (p = 0.0005; dos colas) y el número de plantas leñosas (N). 31
Tabla 5. Ganancia en volumen de árboles encontrados en los sitios Restaurados después de seis meses agrupados por grupo funcional (GF) y estado sucesional (ES). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney (p < 0.05). También se presenta el número de plantas leñosas medidas (N). 33
Tabla 6. Ganancia en altura de arbustos encontrados en los sitios Restaurados después de seis meses agrupados por grupo funcional (GF) y estado sucesional (ES). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney (p < 0.05). También se presenta el número de plantas leñosas medidas (N). 33
Tabla 7. Ganancia en diámetro basal de arbustos encontrados en los sitios Restaurados después de seis meses agrupados por grupo funcional (GF) y estado sucesional (ES). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney (p < 0.05). También se presenta el número de plantas leñosas medidas (N). 33
Tabla 8. Propiedades de suelo por estación en los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 36). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney. Letras diferentes indican diferencias significativas entre estaciones (p < 0.05). 34
Tabla 9. Propiedades físicas del suelo: Profundidad, Pedregosidad, Densidad Aparente y Contenido Gravimétrico de Agua (CGA) en los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios. 36
Tabla 10. pH del suelo de los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05). 37
Tabla 11. Propiedades químicas del suelo: Carbono Orgánico Total (Ct), Nitrógeno Total (Nt) y relación C:N en los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (p < 0.05). 39
Tabla 12. Propiedades químicas del suelo: Nitrógeno Inorgánico (NO_3^- y NH_4^+) y relación NO_3^-: NH_4^+ en los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05). 41
Tabla 13. Propiedades químicas del suelo: Fósforo Total (Pt) y Fósforo Disponible (Pa) en los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05). 42

Índice de Figuras

Figura 1.Climograma (1957-2023). Datos de la Estación Climatológica Temixco (CONAGUA), estado de Morelos, México. 23
Figura 2. Tasa de sobrevivencia de plantas leñosas encontradas en los sitios Restaurados después de seis meses agrupadas por: Grupo Funcional (A) y Estado Sucesional (B). Se muestran los resultados de la prueba Log-Rank ($p < 0.05$). 33
Figura 3. Propiedades físicas del suelo: Profundidad (A), Pedregosidad (B), Densidad Aparente (C) y Contenido Gravimétrico de Agua (D; CGA) en los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios ($p < 0.05$). 36
Figura 4. pH del suelo de los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios ($p < 0.05$). 37
Figura 5. Propiedades químicas del suelo: Carbono Orgánico Total (Ct; A), Nitrógeno Total (Nt; B) y relación C:N (C) en los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios ($p < 0.05$). 38
Figura 6.Propiedades químicas del suelo: concentración de nitrato (NO_3^-; A), amonio (NH_4^+; B) y relación C:N (C) en los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios ($p < 0.05$). 40
Figura 7. Propiedades químicas del suelo: concentración de fósforo total (Pt; A) y fósforo disponible (Pa; B) en los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios ($p < 0.05$). 42
Figura 8. ACP de las variables físicas (A y C) y químicas (B y D) del suelo de los sitios Restaurados durante la estación seca (A y B) y de lluvia (C y D). Se muestran los Factores 1 y 2 así como la contribución a la varianza de cada uno. 43
Figura 9. Regresión lineal de la densidad de plantas (Plant Density; A) y densidad de no leguminosas (Non Legume Density; B) en estación seca y la sobrevivencia (Survival; marzo 2023 - marzo 2024; C) en función de los puntajes del ACP para el Factor 1 en la estación seca de propiedades químicas del suelo. Se muestran los valores de r^2, la línea de regresión y la ecuación. 45
Figura 10. Regresión lineal de la densidad de no leguminosas (Non Legume Density; A) y de la sobrevivencia (Survival; marzo 2023 - marzo 2024; B) en la estación de lluvia en función de los puntajes del ACP para el Factor 1 de las propiedades químicas del suelo en la estación de lluvia. Se muestran los valores de r^2, la línea de regresión y la ecuación. 46
Figura 11. Regresión lineal de la densidad de especies (Specie Density) en la estación seca en función de los puntajes del ACP para el Factor 2 en la estación seca de propiedades químicas del suelo. Se muestran los valores de r^2, la línea de regresión y la ecuación. 46
Figura 12.Regresión lineal de la densidad de especies (Specie Density) en estación de lluvia en función de los puntajes del ACP para el Factor 2 de las propiedades químicas del suelo en la estación seca. Se muestran los valores de r^2, la línea de regresión y la ecuación. 47

Índice de Anexos

Anexo 1. Censo de especies leñosas (marzo/2023). 72
Tabla 14. Abundancia de especies leñosas en el sitio Conservado clasificadas según la familia a la que pertenecen. Se muestran las especies compartidas con los sitios Restaurados (comunes, C) y las no comunes (NC) Datos obtenidos en temporada seca (marzo/2023). 72
Anexo 2. Resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) para el objetivo de Relación Planta-Suelo. 72
Tabla 15. Correlaciones entre variables de la vegetación medidas en la temporada seca y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en cuatro variables físicas del suelo medidas en la misma temporada. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p). 73
Tabla 16. Correlaciones entre variables de la vegetación medidas en la temporada seca y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en ocho variables químicas del suelo medidas en la temporada seca. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p). 73
Tabla 17. Correlaciones entre variables de la vegetación medidas en la temporada de lluvias y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en cuatro variables físicas del suelo medidas en la temporada de lluvias. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p). 74
Tabla 18. Correlaciones entre variables de la vegetación medidas en la temporada de lluvias y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en cuatro variables físicas del suelo medidas en la temporada de lluvias. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p). 74
Tabla 19. Correlaciones entre variables de vegetación medidas en la temporada de lluvias y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en cuatro variables físicas del suelo medidas en la temporada seca. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p). 75
Tabla 20. Correlaciones entre las variables de vegetación medidas en la temporada de lluvias y el Factor 1 o Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en ocho variables químicas del suelo medidas en la temporada seca. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p). 75

Resumen

La restauración ecológica es una herramienta clave para mitigar los impactos de actividades humanas como la minería, que genera alteraciones significativas en los ecosistemas. Esta investigación evalúa la restauración ecológica en una cantera de extracción de roca caliza en una región con Selva Baja Caducifolia, en Tepetzingo, Morelos, a través del análisis de variables de la vegetación y el suelo mineral. El estudio se realizó en dos momentos del año 2023 (marzo y septiembre, coincidiendo con las estaciones de seca y lluvia respectivamente) y comparó seis sitios: uno conservado, uno perturbado y cuatro restaurados en los que se han desarrollado diferentes estrategias de restauración. Se analizó la estructura y composición de plantas leñosas presentes en el sitio conservado y en los sitios restaurados. Además, se evaluaron las siguientes propiedades del suelo: profundidad, pedregosidad, densidad aparente, contenido gravimétrico de agua, pH, las concentraciones de carbono orgánico total, nitrógeno total, nitrógeno inorgánico, fósforo total y disponible, y las relaciones C:N y NO_3^-:NH_4^+. Para determinar diferencias entre los sitios, se utilizaron pruebas no paramétricas como U de Mann-Whitney para el estudio de la vegetación y de Kruskal-Wallis para el estudio de los suelos. Para evaluar la relación entre las plantas y el suelo se aplicaron análisis multivariados. Los resultados mostraron que, aunque la vegetación de los sitios restaurados muestra señales de recuperación en cuanto a presencia de especies nativas, su estructura y composición aún no alcanza los valores del sitio conservado. En los sitios restaurados, destacaron las plantas leguminosas, que presentaron un mayor crecimiento que las no leguminosas y se encontró que las plantas no pioneras tuvieron mayor sobrevivencia que las pioneras. Estos resultados evidencian que si bien, los sitios restaurados se encuentran en etapas tempranas de la sucesión secundaria, no son etapas iniciales Las especies con mayor sobrevivencia en orden decreciente fueron: *Pithecellobium dulce* (Fabaceae), *Ipomoea pauciflora* (Convolvulaceae), *Croton ciliatoglandulifer* (Euphorbiaceae), *Mimosa benthamii* (Fabaceae) y *Lysiloma divaricatum* (Fabaceae) por lo que se recomiendan para futuros esfuerzos de restauración en el área impactada por minería. Por otra parte, los suelos en los sitios restaurados mostraron patrones heterogéneos en la recuperación de sus propiedades, lo cual en parte podría deberse a que los procesos de revegetación y adición de materia orgánica han sido antropogénicos, así como la influencia de la variabilidad climática interanual. La densidad de plantas no leguminosas, y su sobrevivencia tras un año se relacionan con el pH y la concentración de nitrógeno total en el suelo, independientemente de la estacionalidad de las lluvias. Asimismo, el efecto acumulativo en el Pt desde la estación seca y hasta después de seis meses de lluvias repercute positivamente en la densidad de especies pioneras. Estos resultados subrayan la importancia la fertilidad del suelo y de la selección de especies leñosas para acelerar la restauración ecológica en sitios perturbados por minería.

Abstract

Ecological restoration is a key tool for mitigating the impacts of human activities such as mining, which causes significant alterations in ecosystems. This research evaluates ecological restoration in a limestone quarry located in a region with Tropical Dry Forest in Tepetzingo, Morelos, through the analysis of vegetation and mineral soil variables. The study was conducted in two periods of 2023 (March and September, corresponding to the dry and rainy seasons, respectively) and compared six sites: one conserved, one disturbed, and four restored sites where different restoration strategies have been implemented. The structure and composition of woody plants present in the conserved and restored sites were analyzed. Additionally, the following soil properties were evaluated: depth, stoniness, bulk density, gravimetric water content, pH, total organic carbon concentrations, total nitrogen, inorganic nitrogen, total and available phosphorus, and the C:N and NO^{3-}:NH^{4+} ratios. To determine differences between the sites, non-parametric tests such as the Mann-Whitney U test for vegetation analysis and the Kruskal-Wallis test for soil analysis were applied. To assess the relationship between plants and soil, multivariate analyses were performed. The results showed that although the vegetation in the restored sites shows signs of recovery in terms of the presence of native species, their structure and composition have not yet reached the values of the conserved site. In the restored sites, leguminous plants stood out, exhibiting greater growth than non-leguminous species, and it was found that non-pioneer plants had higher survival rates than pioneer species. These results indicate that although the restored sites are in the early stages of secondary succession, they are not in the initial stages. The species with the highest survival rates, in decreasing order, were: *Pithecellobium dulce* (Fabaceae), *Ipomoea pauciflora* (Convolvulaceae), *Croton ciliatoglandulifer* (Euphorbiaceae), *Mimosa benthamii* (Fabaceae), and *Lysiloma divaricatum* (Fabaceae), which are recommended for future restoration efforts in the area impacted by mining. On the other hand, soils in the restored sites showed heterogeneous patterns in the recovery of their properties, which may partly be since revegetation processes and organic matter addition have been anthropogenic, as well as the influence of interannual climatic variability. The density of non-leguminous plants and their one-year survival were related to soil pH and total nitrogen concentration, regardless of rainfall seasonality. Likewise, the cumulative effect of Pt from the dry season until after six months of rainfall positively influences the density of pioneer species. These results highlight the importance of soil fertility and the selection of woody species to accelerate ecological restoration in sites disturbed by mining.

Introducción

La Selva Baja Caducifolia (SBC, *sensu* **Miranda y Hernández-X, 1963**) es un ecosistema clave y representativo de México. Aproximadamente el 60% de la vegetación del país corresponde a la SBC **(Trejo y Dirzo, 2000)**, un ecosistema clave en la regulación del clima y los ciclos biogeoquímicos globales **(Bonan y Fagundes, 2008)**. Aunque presenta variabilidad en condiciones edáficas, climáticas, biodiversidad y funciones ecosistémicas **(Thakur et al., 2021)**, su rasgo distintivo es una estación seca severa (PM < 100 mm) que puede extenderse de tres a ocho meses **(Mesa-Sierra et al., 2025)**. La flora de la SBC está compuesta principalmente por taxones neotropicales, con una alta proporción de endemismo, ya que alrededor del 60% de sus especies vegetales son exclusivas de México **(Rzedowski, 1978; 1991)**. A pesar de su importancia ecológica, la SBC ha sido poco estudiada **(Mesa-Sierra et al., 2025)**. Aproximadamente el 90% de estos ecosistemas han sido degradados por actividades como la agricultura y la ganadería **(Banda et al., 2016)**, así como por el desarrollo turístico y la extracción minera **(Miles et al., 2006; Portillo-Quintero et al., 2015; Singh y Chaturvedi, 2017)**. Estas alteraciones reducen su capacidad de recuperar estructura y funcionalidad ante futuras perturbaciones. Para acelerar su regeneración, las áreas degradadas pueden beneficiarse de intervenciones de restauración ecológica **(SER, 2013)**. Sin embargo, el impacto de estas estrategias en la SBC sigue siendo poco conocido **(Mesa-Sierra et al., 2025)**. Este estudio se realizó en una cantera minera abandonada colindante con la Reserva Estatal Sierra de Monte Negro (RESMN), Morelos, México. Su objetivo fue evaluar la efectividad de las intervenciones de restauración ecológica en esta zona degradada. Se analizaron (i) la estructura y composición de las plantas leñosas, (ii) el desempeño de las plantas leñosas, (iii) las propiedades físicas, físicoquímicas y químicas del suelo, y (iv) la relación entre el éxito de las plantaciones y las propiedades del suelo. Los hallazgos de este estudio proporcionan información valiosa para optimizar futuros esfuerzos de restauración en áreas mineras degradadas.

Antecedentes

Selva Baja Caducifolia

La SBC es uno de los ecosistemas más importantes y representativos de México. Más del 60% de la vegetación en el territorio nacional corresponde a SBC **(Trejo y Dirzo, 2000)**. Este ecosistema cuenta con la mayor biodiversidad de todos los ecosistemas terrestres donde casi el 40% de sus especies son endémicas **(Rzedowski, 1991; Dirzo, 2011; CONABIO, 2022)**. La familia Fabaceae constituye de las más representativas en las SBC de México ya que cuenta con 1 851 especies dentro de 140 géneros **(Sousa et al., 2001)**. Otras familias también están muy bien representadas en las SBC como Euphorbiaceae, Burseraceae, Cactaceae, Asteraceae, Malpighiaceae, Rubiaceae y Anacardiaceae **(Miranda y Hernández, 1963 y Trejo; Dirzo, 2000 y Dirzo, 2011)**. Asimismo, los ecosistemas de SBC proporcionan numerosos servicios ecosistémicos clave entre los que se encuentran la regulación del ciclo del agua y el clima, la protección del suelo contra la erosión y

la regulación de los ciclos de nutrientes en el mismo, así como la provisión de recursos naturales esenciales, como alimentos y medicamentos **(Maldonado-Almanza, 2007; Bonan y Fagundes, 2008)**. Así, las SBC se consolidan como un ecosistema emblemático de México.

Una característica distintiva de las SBC en México es su marcada estacionalidad. Existen dos estaciones en estos ecosistemas: la estación seca, que tiene una duración de cuatro a seis meses; y la estación de lluvia, en la cual la mayor parte de la precipitación cae en los meses de mayo a octubre determinando la fenología de las plantas **(Dirzo et al. 2011)**. La temporalidad y la abundancia de la precipitación controla también los ciclos de nutrientes en el suelo **(Campo, 2016)**. Durante la estación seca se acumulan nutrientes en el suelo debido a la falta de humedad y la mayoría de las plantas pierden sus hojas como adaptación a la baja disponibilidad de agua y al bajo suministro de nutrientes **(Jaramillo et al., 2003)**. Durante la estación de lluvias, el ciclo de nutrientes en el suelo se vuelve más activo por la humedad y las plantas brotan nuevamente sus hojas y flores **(Berlanga-Robles et al. 2018; Jaramillo et al., 2003)**. La estación seca es un factor determinante para las plantas, ya que define cuáles podrán establecerse y sobrevivir **(Ceccon, 2011)**. Por tanto, la estacionalidad de las SBC determina el establecimiento de especies vegetales específicas, adaptadas a este ecosistema.

La SBC ha sido considerada uno de los ecosistemas más perturbados. Estudios previos indican que la SBC ha sido considerada uno de los ecosistemas más perturbados. Estudios previos indican que aproximadamente el 90% de estos ecosistemas han sido degradados por actividades como la agricultura y la ganadería **(Banda et al., 2016)**, así como por el desarrollo turístico y la extracción minera **(Miles et al., 2006; Portillo-Quintero et al., 2015; Singh y Chaturvedi, 2017)**. Estas alteraciones reducen su capacidad de recuperar estructura y funcionalidad ante futuras perturbaciones **(Miles et al., 2006; Portillo-Quintero et al., 2015; Singh y Chaturvedi, 2017)**. A pesar de su importancia ecológica, la SBC ha sido poco estudiada **(Mesa-Sierra et al., 2025).** Así, la acción antropogénica sobre este ecosistema está teniendo graves consecuencias en su extensión y permanencia en el territorio mexicano.

Minería

La extracción de minerales en canteras constituye una actividad económica crucial en numerosos países, siendo la industria minera mexicana un actor destacado en la economía nacional. En México, la importancia de esta industria se refleja en su posición como la cuarta actividad más relevante para la economía del país **(Tetreault, 2013)**. Con 32 plantas cementeras distribuidas en el territorio nacional, estas instalaciones tienen la capacidad conjunta de producir 51 millones de toneladas anuales de cemento **(de la Garza-Garza y Arteaga-García, 2011)**. La producción de cemento ha experimentado un crecimiento constante, aumentando de 39.7 a 44.9 millones de toneladas, generando ganancias que oscilan entre 59 828 y 64 047 millones de pesos **(Galán y Corrales, 2017)**. El aumento constante en la producción

ha dado lugar a la proliferación de canteras y a pesar de la importancia de la minería para la construcción e infraestructura, la extracción de minerales en estas canteras plantea desafíos significativos en términos de impactos ambientales y sociales sobre los ecosistemas, particularmente cuando la extracción se realiza en áreas naturales con un alto valor ecológico y biodiversidad.

En este contexto, una destacada cementera en México estableció su planta de extracción de roca caliza en Tepetzingo, Emiliano Zapata, Morelos, una ubicación que limita al oeste con la Reserva Estatal Sierra de Montenegro (RESMN), decretada como Reserva Estatal en 2008 **(CEMOSA, 2015)**. La RESMN abarca una superficie de 7 538 hectáreas y funciona como un corredor biológico entre diversas Áreas Naturales Protegidas (ANP) del estado de Morelos **(Vázquez-Márquez et al., 2020)**. Esta reserva representa uno de los relictos mejor conservados de Selva Baja Caducifolia **(Gobierno del Estado de Morelos y CEAMA, 2008)**. Por lo tanto, el manejo y la rehabilitación adecuada de las canteras de extracción abandonadas en esta área son esenciales para mitigar los impactos de la minería y contribuir a la conservación de la biodiversidad que caracteriza a las SBC de México.

La presencia de canteras en un territorio hace que sus atributos paisajísticos se vean afectados. El procedimiento consiste en eliminar toda la cobertura vegetal y el suelo para dejar al descubierto el sustrato rocoso con el fin de extraerlo **(Bonfil et al., 2022)**. Esto modifica drásticamente el paisaje y tiene una repercusión negativa sobre la composición, estructura, configuración y servicios ecosistémicos del mismo **(Jorba y Vallejo, 2010)**. El suelo retirado antes de la explotación es almacenado con el fin de volver a colocarlo cuando la extracción haya culminado, sin embargo, durante el almacenamiento, este suelo puede sufrir fuertes modificaciones como la disminución del contenido de materia orgánica y nutrientes o un balance alterado entre ellos, cambios en el pH y/o pérdida de la biodiversidad, alterando su funcionamiento ecológico **(Jiménez et al. 2006; Jorba y Vallejo, 2010)**. La ausencia o escasez de suelo en estos sitios provoca alteraciones en el relieve que originan una morfología inestable susceptible a erosión por agua y viento **(Jiménez et al. 2006; Jorba y Vallejo, 2010)**. La capacidad de retención de agua de este suelo y del sustrato rocoso que subyace, suele ser baja, y la radiación solar, al incidir de manera directa, aumenta la temperatura superficial **(Jorba y Vallejo, 2010)**. Por tanto, el establecimiento de la vegetación y la recuperación de las características del suelo constituye todo un reto y la recuperación de los atributos del paisaje puede ser lenta por la severa degradación del sitio.

Sucesión Natural

La recuperación de un sitio que ha sido perturbado puede ocurrir de forma natural. La sucesión natural es el proceso de reemplazo de la vegetación a lo largo del tiempo y el espacio en un determinado sitio **(Smith y Smith, 2007)**. Las primeras especies que colonizan de manera natural un sitio se denominan pioneras o de sucesión temprana **(Finegan, 1984)**. Estas especies son capaces de adaptarse a las difíciles condiciones iniciales presentes en un sitio perturbado, como la falta de suelo y la alta exposición

solar **(Finegan, 1984; Ceccon y Martínez-Garza, 2016)**. Las especies pioneras presentan ciclos de vida cortos, rápidas tasas de crecimiento y alta producción de semillas que pueden ser dispersadas por el viento o los animales. Estas especies crean un entorno que facilita la llegada de especies no pioneras o de sucesión tardía. Estas últimas, que conforman la selva madura, tienen ciclos de vida largos, crecimiento lento, tolerancia a la sombra y semillas grandes, a menudo dispersadas por animales **(Finegan, 1984; Poorter et al., 2004)**. Por tanto, el grado de perturbación de un sitio influye directamente en su estado de sucesión y las especies que pueden establecerse con el transcurso de la sucesión natural.

Restauración Ecológica

La recuperación de un sitio también puede ocurrir de forma asistida intentando recuperar características clave en un ecosistema que ha sido degradado. La restauración ecológica es una disciplina que pretende contribuir a acelerar el proceso de sucesión natural en ecosistemas perturbados de manera que se recuperen su estructura, función y autosuficiencia **(SER, 2013)**. También es definida como la práctica de intervenir en la recuperación de los ecosistemas que han sido degradados, dañados o destruidos, mientras que la ecología de la restauración es la ciencia que aporta conceptos, metodologías y herramientas para esta intervención **(Gann et al., 2019)**.

En la restauración ecológica inicial de una mina, es crucial utilizar especies pioneras debido a su capacidad de soportar el estrés ambiental y mejorar las condiciones del suelo, estabilizando el sustrato y controlando la erosión **(Gastauer et al., 2018)**. Estas especies actúan como facilitadoras, mitigando la degradación ambiental a corto plazo y favoreciendo el establecimiento de especies sucesionales tardías al proporcionar sombra y nutrientes a través de la hojarasca **(Gastauer et al., 2018)**. El monitoreo a largo plazo es esencial para evaluar el éxito de la restauración y se deben realizar ajustes según sea necesario para lograr los objetivos de conservación deseados **(Aronson et al., 2006; SER, 2013)**. La restauración ecológica se basa en acciones conscientes y planificadas llevadas a cabo por el ser humano para devolver la funcionalidad a un ecosistema que ha sufrido algún tipo de perturbación.

Dentro de la restauración ecológica existen diferentes niveles de intervención que incrementan su grado de complejidad en función de los esfuerzos destinados a la recuperación del ecosistema perturbado. La intervención mínima contempla tan solo la eliminación de la perturbación específica que afecta un determinado ecosistema, dejando que el mismo se regenere naturalmente **(Ceccon y Martínez-Garza, 2016)**. La intervención intermedia contempla, además, actividades como la siembra directa y remoción de especies competidoras, garantizando un mayor éxito en la sobrevivencia de las especies **(Holl, 1999 y Ceccon y Martínez-Garza, 2016)**. Finalmente, la intervención máxima requiere mayores cantidades de dinero y esfuerzo humano y se establecen plantaciones **(Vásquez-Yanes et al. 1999; Martínez-Garza et al. 2016)**, lo que exige mayor conocimiento previo sobre la historia de vida de las especies vegetales que serán plantadas **(Ceccon y Martínez-Garza, 2016)**. La

implementación de las acciones de restauración dependerá de la disponibilidad de recursos y conocimiento de quienes las ejecutan.

Sitio de referencia

Los proyectos de restauración deben de contemplar ciertos estándares para que se pueda evaluar su éxito. Los ecosistemas cercanos a zonas perturbadas que están mejor conservados pueden ser tomados como referencia, lo que permite evaluar el cumplimiento de metas en los proyectos de restauración al tener menor incidencia de disturbios antropogénicos **(SER, 2013)**. Además, de acuerdo con la cercanía a la zona perturbada, pueden ser fuente de propágulos para favorecer la regeneración de la vegetación **(Howe y Martínez-Garza, 2014)**. Al comparar la zona conservada aledaña, la zona perturbada, con la zona perturbada bajo restauración se pueden establecer indicadores adecuados que permitan medir el éxito de la restauración.

Atributos de la vegetación

Entre los atributos de la vegetación que se pueden comparar entre la zona de referencia y la restaurada están la estructura y composición de la vegetación establecida. La estructura de una comunidad vegetal abarca su disposición horizontal y vertical y la abundancia, frecuencia y dominancia contribuyen a definir su complejidad **(Domínguez-Gómez et al., 2018)**. La composición se define como el número de familias, géneros y especies que se registran dentro del bosque al momento de realizar un inventario **(Louman et al., 2001)**. Entre los componentes que se consideran para evaluar esta variable, destaca la riqueza de especies **(Louman et al., 2001)**, definida como el número total de especies que se encuentran en un hábitat, ecosistema, paisaje, área o región determinada **(Colwell, 2009)**. Estos atributos son especialmente relevantes, ya que proporcionan información sobre la efectividad de los procesos de restauración ecológica en ecosistemas perturbados.

También es posible evaluar el desempeño de las plantas establecidas en las áreas de restauración. Este atributo se puede cuantificar en términos de sobrevivencia de las plantas después de un periodo de tiempo determinado y el crecimiento tanto en altura como en diámetro basal **(Márquez-Torres, 2022)**. El crecimiento en altura está vinculado a la competencia de las plantas por la luz **(Carrasco-Carballido et al., 2019)**. Por tanto, el desempeño como atributo de la vegetación también contribuye a informar sobre el éxito de los proyectos de restauración.

Estos atributos pueden estar influenciados por las características asociadas a la historia de vida de las plantas, lo que permite agruparlas según su grupo funcional en leguminosas o no leguminosas según su capacidad para fijar nitrógeno; o según su estado sucesional en pioneras o no pioneras según se explicó anteriormente. Por ejemplo, se ha visto que las especies pioneras presentan altas tasas de sobrevivencia y crecimiento en ambientes perturbados **(Weiher et al., 1999; Rusch et al., 2003; Carrasco-Carballido et al., 2019; Márquez-Torres, 2022)**. Asimismo, altas tasas de crecimiento en altura por parte de las especies pioneras sugieren una pronta recuperación de la cobertura vegetal y una mayor competencia por la luz **(Carrasco-**

Carballido et al., 2019). Si las tasas de crecimiento en altura de las especies pioneras y no pioneras son similares, la competencia se reduce y la sucesión natural del sitio se ralentiza **(Carrasco-Carballido et al. 2019)**. Adicionalmente, se ha observado que algunas especies no pioneras pueden tener un desempeño tan favorable como las pioneras **(Carrasco-Carballido, 2019; Martínez-Garza et al., 2013)**. En particular, las leguminosas, tanto de pioneras como no pioneras, tienden a mostrar un mejor desempeño en comparación con las no leguminosas **(Márquez-Torres, 2016; Márquez-Torres, 2022; Martínez-Garza et al., 2016)**. Adicionalmente, se ha observado un compromiso entre el crecimiento y la sobrevivencia en el que se espera que, dentro de la selva, las especies no pioneras presenten bajas tasas de crecimiento, pero una mayor sobrevivencia y que en los claros, las especies pioneras presenten altas tasas de crecimiento, pero baja sobrevivencia **(Wright et al., 2010)**. Otros estudios en sitios perturbados **(Gerhardt, 1996; Carrasco-Carballido et al. 2019; Massad et al. 2011; Martínez-Garza et al. 2013)** han mostrado que el compromiso no es evidente, ya que especies pioneras han presentado menores tasas de sobrevivencia con relación a especies no pioneras. Por tanto, el desempeño de las plantas en sitios perturbados es variable y no sigue un patrón definido; sin embargo, las especies leguminosas y pioneras destacan sobre las demás. También se ha probado que con una riqueza de al menos 6 especies la sobrevivencia de las plantas mejora en comparación con plantaciones de riqueza baja **(Márquez-Torres, 2022)**.

Importancia de leguminosas y pioneras en ambientes perturbados

En la recuperación de la cobertura vegetal de sitios que han sido perturbados, las especies que mejor desempeño tienen son las leguminosas. Su habilidad simbiótica para fijar N sería el factor más importante que contribuye al éxito de las especies leguminosas para colonizar **(Zitzer et al., 1996; Fredericksen et al., 2000)**. Asimismo, el mayor tamaño de sus semillas hace que sean capaces de rebrotar en diferentes estados de su ciclo de vida, asegurando la persistencia de los individuos que lograron establecerse y contribuyendo al establecimiento del banco de plántulas en el suelo y también porque producen mayor biomasa en forma de hojarasca que las no leguminosas **(Barchuk et al., 2006)**. Por todo lo anterior, se plantea que las leguminosas cuentan con las mayores ventajas de adaptación en ecosistemas pobres en nutrientes y degradados como lo constituyen la gran mayoría de las SBC.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que las especies pioneras son especialmente adecuadas para ecosistemas perturbados debido a varias características. Se ha reportado que las especies pioneras presentan elevadas tasas de crecimiento bajo condiciones de alta disponibilidad de luz, lo cual se debe a sus hojas compuestas **(Lohbeck et al., 2013)** y a una mayor área foliar específica **(Poorter et al., 2004)**. Por otra parte, en áreas degradadas se registran elevadas temperaturas a nivel del suelo, por lo que la sobrevivencia de las plantas pudiera depender de qué tan rápido crecen en altura **(Márquez-Torres, 2022)**. La rápida recuperación del dosel, asegurada por el crecimiento acelerado de las especies pioneras, también contribuye a una mayor producción de hojarasca **(Lamb et al., 2005; Valencia-Esquivel, 2012; Saucedo-**

Morquecho, 2016; Rojas-Robles, 2023). Por todo esto, se podría esperar un mejor desempeño de las especies pioneras en comparación con las no pioneras, lo que las hace más recomendables para la restauración de sitios perturbados en las etapas iniciales de la sucesión natural.

Fertilidad del suelo

La fertilidad del suelo es un importante factor para evaluar en proyectos de restauración. La fertilidad del suelo se define como su capacidad para servir como un sustrato adecuado en el que las plantas puedan crecer y desarrollarse, facilitando el desarrollo de las raíces, el suministro de agua, aire y nutrientes a las plantas **(Schroth y Sinclair, 2003)**. Para su evaluación se miden variables relacionadas con sus propiedades físicas y químicas **(OECD, 2003)**. El cambio de uso del suelo modifica significativamente las propiedades físicas y químicas, afecta la fertilidad e incrementa la erosión y la compactación del suelo **(Geissen et al., 2009; Moges et al., 2013)**. Por tanto, la fertilidad del suelo influye sobre la comunidad de plantas que sobre él se establecen.

La fertilidad de los suelos en las SBC está influenciada por múltiples factores. Tanto el desarrollo del suelo como la vegetación que lo coloniza dependen de su origen, la topografía y la disponibilidad de humedad **(González y Zak, 1996)**. En general, estos suelos son pobres en nutrientes, independientemente de su estado de conservación **(Khurana y Singh, 2001)**. La limitada disponibilidad de nitrógeno y fósforo representa una restricción importante para la productividad vegetal en este ecosistema **(Ceccon et al., 2003)**. El fósforo en el suelo es el nutriente que presenta mayor limitación **(Romualdo-Romualdo, 2003)** y está estrechamente relacionado con la descomposición de materia orgánica y el intemperismo de minerales que contienen este elemento **(Siebe et al., 2006)**, mientras que el nitrógeno proviene principalmente del mantillo orgánico en descomposición **(Siebe et al., 2006)**. La fertilidad de los suelos en las SBC está condicionada por su baja riqueza en nutrientes esenciales.

Influencia de la estacionalidad en los suelos de SBC

La disponibilidad de nutrientes en la SBC está estrechamente vinculada a la presencia de humedad en el suelo. Durante la estación seca, los nutrientes tienden a acumularse debido a la falta de absorción por parte de las plantas y a la reducida actividad de descomposición microbiana **(Jaramillo y Sanford, 1995 y Carrasco-Carballido, 2019)**. Así, los nutrientes se acumulan en el suelo durante la estación seca debido a la reducción de la lixiviación, las bajas tasas de descomposición, la mínima renovación microbiana y la poca absorción de las plantas **(Jaramillo y Sanford, 1995)**. Durante la época de lluvias aumenta la humedad en el suelo y el ciclo de los nutrientes se reanuda a medida que los nutrientes se liberan, por medio de la descomposición de la hojarasca por los microorganismos **(Jaramillo y Sanford, 1995)**. Dado el contraste entre la estación seca y de lluvia, la acumulación de nutrientes en el suelo puede diferir. En general se han visto mayores acumulaciones de Ct, Nt, NO_3^- y NH_4^+ y valores de pH más ácidos en época seca y no siempre se

reportan cambios en Pt **(Jiménez-Hernández, 2021)**. De esta manera, las lluvias son un recurso esencial en el ciclo de nutrientes de la SBC.

Características de suelos afectados por minería

Los suelos en áreas afectadas por minería suelen ser especialmente pobres y presentan diversas limitaciones para el desarrollo de las plantas. En la minería a cielo abierto, las capas superficiales del suelo, que contienen la mayor parte de la materia orgánica (*solum*), son eliminadas, lo que reduce o elimina el espesor del suelo **(Peña-Ramírez, 2013)**. Esta reducción afecta directamente la capacidad del suelo para soportar el crecimiento de las plantas, ya que disminuye el volumen disponible para la penetración de raíces, la profundidad, la retención de humedad, el suministro de nutrientes, y el soporte físico de las plantas **(Peña-Ramírez, 2013)**. Adicionalmente, la pedregosidad, común en suelos mineros, puede servir como un indicador de la disponibilidad de materia orgánica, siendo generalmente mayor en suelos degradados en comparación con los conservados **(Siebe et al., 2006)**. Otro parámetro crítico es la densidad aparente, que mide la relación entre el peso del suelo seco y su volumen, reflejando el nivel de compactación y degradación del suelo **(Jiménez-Hernández, 2021)**. Suelos severamente compactados, como los afectados por la minería, presentan menor capacidad para retener agua, lo que restringe aún más el crecimiento vegetal **(Campillo et al., 2000)**. Estudios en SBC han demostrado que actividades como la ganadería aumentan la densidad aparente del suelo entre un 15% y un 25% en comparación con suelos conservados, lo que resulta en una mayor compactación y una disminución en la aireación del suelo **(Jara et al., 2009; Fuentes-Hernández et al., 2019; Tripathi y Singh, 2009)**. Esta compactación, junto con la cercanía de la roca madre, actúa como una barrera mecánica para el desarrollo de las raíces, lo que limita su crecimiento y, en consecuencia, afecta el crecimiento de los árboles **(Peña-Ramírez, 2013)**. Por tanto, en suelos mineros las propiedades físicas del suelo podrían verse severamente afectadas en comparación con suelos de sitios conservados.

La dinámica de los contenidos de nutrientes en los suelos perturbados es un proceso complejo influenciado por varios elementos. Dentro de esos elementos destacan las interacciones entre factores específicos del sitio y el uso de la tierra lo que dificulta predecir las trayectorias sucesionales **(Guariguata y Ostertag, 2001)**. En general, los suelos de sitios conservados tienden a tener mayor contenido de nutrientes que suelos perturbados o restaurados **(Tripathi y Singh, 2009; Johnson y Wedin, 1997)** así como pH menos ácidos **(Tiwari et al., 2019; Carrasco-Carballido et al., 2019; Da Silva et al., 2021)** aunque el comportamiento es variable. La medición de los contenidos de nutrientes y el pH en suelos perturbados pueden ser indicadores del éxito de la restauración si son comparados con suelos de sitios conservados.

El comportamiento del pH en suelos perturbados no está bien definido. Se han encontrado suelos más ácidos en sitios perturbados que en sitios conservados **(Tiwari et al., 2019; Carrasco-Carballido et al., 2019; Da Silva et al., 2021)**. El estudio de **Jiménez-Hernández (2021)** encontró que el pH fue similar en sitios con

diferente grado de perturbación en comparación con un sitio conservado de SBC después de seis meses. Los estudios de **Fuentes-Hernández (2019)** y **Jara et al., (2009)** encontraron los mismos pH (ligeramente básicos y neutros respectivamente) en suelos agropecuarios con relación a suelos conservados. En general, el cambio en el pH debido al cambio de uso de suelo es poco frecuente y se sugiere que el tiempo de uso de los sitios podría ser una de las variables relevantes para observar este cambio **(Jiménez-Hernández, 2021)** aunque el origen del suelo, sus características iniciales, el clima, la vegetación, la descomposición de la materia orgánica son características más determinantes en este cambio y su variabilidad **(Neina, 2019)**. El pH pudiera no ser un indicador determinante en el éxito de los proyectos de restauración debido a que su variabilidad podría estar asociada con el tipo de perturbación y características específicas del sitio.

También se ha visto que el carbono orgánico total (Ct) no aumenta continuamente con la sucesión. **Saynes et al., (2005)** encontraron que el Ct no variaba según la edad del bosque. Se ha visto una disminución del Ct en suelos perturbados con respecto a conservados **(Johnson y Wedin, 1997; Tripathi y Singh, 2009; Fuentes-Hernández et al., 2019; Tiwari et al., 2019)**. Aunque también se ha reportado un mayor contenido de Ct en pastizales que en sitios conservados debido a la descomposición de raíces de los árboles después de la deforestación **(Jaramillo et al., 2003)**. Por tanto, el Ct también es un indicador sobre el que podrían estar influyendo diferentes factores y por tanto no presentar un patrón específico en sitios perturbados.

El contenido de nitrógeno orgánico total (Nt) tiene un comportamiento más estable en sitios perturbados, aunque también se presentan variaciones. Se ha encontrado un mayor Nt en sitios sucesionalmente tempranos que en sitios con sucesión tardía **(Saynes, 2005).** Las SBC tienen un ciclo abierto de N (altas pérdidas por lixiviación y emisiones) **(Martínez-Yrízar, 1995)**. Cuando la perturbación es menos severa se reducen las pérdidas por lixiviación de N en sus formas inorgánicas **(Jaramillo y Sanford, 1995)**. También se ha visto que el Nt es mayor en bosques jóvenes que en bosques viejos **(Saynes et al., 2005)**. De manera general se esperaría que el Nt en sitios que han sufrido algún tipo de perturbación sea menor que en sitios conservados.

La calidad de la materia orgánica está dada por la relación C:N. Si esta relación es baja, indica que el contenido de N es mayor que el de C, con lo cual se favorece una rápida mineralización del N durante la época de lluvia (materia orgánica de alta calidad) y si es alta indica que el contenido de N es menor que el de C, con lo cual el N se descompone más lentamente y está menos disponible (materia orgánica de baja calidad) **(Morales-Romero et al., 2015)**. En general, los bosques viejos o conservados tienden a mostrar una relación C:N baja mientras que los sitios sucesionalmente tempranos tienden a mostrar una relación C:N alta **(Saynes et al., 2005)**. Se observó que esta relación se mantuvo estable en ambos sitios durante seis meses **(Saynes et al., 2005)**. En suelos agrícolas la relación C:N es relativamente constante y suele estar dentro de un rango estrecho de 10 a 12 **(Gregorich et al., 1994)**. **Jenny (1941)** observó que en condiciones similares de humedad, la relación

C:N disminuye a medida que aumenta la temperatura media anual probablemente debido a una descomposición más intensa de la materia orgánica a temperaturas altas. La cantidad y tasa de cambio en el Ct y Nt pueden depender más de los niveles iniciales de estos elementos que del tratamiento o práctica de manejo impuesto en el suelo **(Gregorich et al., 1994)**. Por tanto, aunque la relación C:N ha mostrado variabilidad, puede ser un buen índice a tomar en cuenta para evaluar que el funcionamiento del ecosistema esté ocurriendo correctamente.

Los contenidos de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) son las formas inorgánicas del nitrógeno y resultan importantes propiedades químicas en los suelos que han sido perturbados. Los microbios del suelo inmovilizan o asimilan una porción del Nt derivado de la materia orgánica en descomposición y el exceso se acumula como nitrógeno orgánico **(Vitousek y Matson, 1988)**. La mineralización de nitrógeno se mide para evaluar la capacidad de la materia orgánica para suministrar nitrógeno inorgánico, que es la principal forma de nitrógeno disponible para las plantas y que puede lixiviarse a través del suelo por ser insoluble **(Gregorich et al., 1994)**. Aunque la principal forma de nitrógeno en la solución nutritiva en cultivos es el NO_3^-, el NH_4^+ podría ser beneficioso para la planta **(Gashaw y Mugwira 1981; Sonneveld, 2002)**. NH_4^+ se sintetiza cuando hay suficiente poder reductor y esqueletos de carbono para su incorporación en aminoácidos **(Mengel y Kirkby, 1987)**. La disponibilidad de esqueletos de carbono depende principalmente de la fotosíntesis y la disponibilidad de aminoácidos depende de la concentración de nitrógeno y sus formas inorgánicas en la zona de las raíces **(Tabatabaei et al., 2008)**. Por otra parte, se ha visto que las plantas jóvenes son sensibles a altas concentraciones de NH_4^+, lo que causa tallos cortos y delgados **(Ingestad, 1973)** y un sistema radicular débil **(Matsumoto y Tamura, 1981)**. La presencia de altas concentraciones de NH_4^+ en los suelos ha reducido la concentración de minerales como K, Ca y Mg mientras que NO_3^- tiene efecto opuesto **(Alan 1989; Kotsiras et al., 2002)**. Además, la existencia de NH_4^+ en la zona de las raíces puede reducir aún más el pH debido a la secreción de H^+ originada de los procesos de nitrificación **(Tabatabaei et al., 2008)**. Cuando el NH_4^+ es la única fuente de nitrógeno se producen restricciones en el crecimiento de las plantas **(Pilbeam y Kirkby, 1992)**. También el NH_4^+ puede causar inhibición de la fotosíntesis por toxicidad **(Givan, 1979; Frantz et al., 1982; Norisada y Kojuma 2005)**. Por tanto, las concentraciones de NO_3^- deberían ser mayores que las de NH_4^+ en suelos que han sido perturbados para garantizar que las plantas se establezcan exitosamente.

Las proporciones de NO_3^- y NH_4^+ permiten evaluar si la dinámica en el flujo de estos nutrientes está ocurriendo de forma efectiva. La tasa de NO_3^-:NH_4^+ en la zona de las raíces ofrece un medio importante para controlar la absorción relativa de nutrientes en dependencia de lo que necesiten las plantas **(Sonneveld, 2002**). Se conoce que la disminución de la proporción NO_3^-:NH_4^+ en la zona de las raíces perjudica el crecimiento y reduce el rendimiento **(Guo, 2002)**. Equilibrar la proporción de NO_3^-:NH_4^+ puede optimizar la adsorción de nutrientes y mantener el pH del suelo en el

rango adecuado **(Tabatabaei et al., 2008)**. El menor crecimiento de las plantas en suelos con altas concentraciones de NH_4^+ podría deberse a la falta de NO_3^- como fuente de nitrógeno y al aumento de la demanda de carbohidratos por parte de la planta, para la asimilación y detoxificación del NH_4^+ **(Tabatabaei et al., 2008**). Por tanto, es necesario garantizar un equilibrio adecuado en las proporciones de NO_3^- y NH_4^+ en el suelo para optimizar la nutrición de las plantas y promover un crecimiento saludable.

El efecto del cambio de uso del suelo sobre el contenido total de fósforo (Pt) y su disponibilidad (Pa) sigue siendo incierto debido a múltiples factores. La erosión del suelo y la descomposición de la materia orgánica son las principales causas de pérdida de fósforo, ya que liberan este nutriente a un ritmo que depende de las condiciones del ecosistema **(Maranguit et al., 2017)**. Este elemento es un nutriente limitante en la productividad de las plantas, especialmente en regiones tropicales **(Dieter et al., 2010; Spohn et al., 2013)**. La conversión de bosques a tierras agrícolas no solo disminuye la cantidad de fósforo total, sino que también aumenta la proporción de formas no disponibles, afectando negativamente su ciclo biogeoquímico **(Chacon y Dezzeo, 2004)**. Sin embargo, estudios en intervenciones de restauración ecológica indican que, después de tres años, los niveles de Pt pueden permanecer similares, lo que sugiere que la estacionalidad tiene un mayor impacto que el tiempo de establecimiento de los sitios **(Valdespino et al., 2009; Carrasco-Carballido et al., 2019)**. La acelerada erosión del suelo por el cambio de uso de la tierra puede reducir hasta la mitad la cantidad de materia orgánica, una fuente clave de fósforo disponible (Pa), ya que su descomposición lo recicla para las plantas **(Pimentel et al., 1995; Groppo et al., 2015)**. Pa proviene principalmente del material parental y se acumula en las capas más profundas del suelo, donde las raíces lo absorben más fácilmente **(Morales-Romero et al., 2015)**. Sin embargo, la capacidad de las raíces para alcanzar estas capas puede verse limitada por la reducción de la actividad micorrízica tras la perturbación del suelo, afectando aún más la disponibilidad de fósforo **(Maranguit et al., 2017)**. Las concentraciones de fósforo total y disponible podrían destacar la importancia de minimizar las perturbaciones y conservar la materia orgánica para garantizar el éxito de los proyectos de restauración.

Justificación

El presente estudio busca documentar el estado de los sitios restaurados para promover la implementación de proyectos de restauración ecológica más efectivos en la cantera estudiada. Actualmente, se desconoce la efectividad del programa de restauración de la empresa. A partir de los resultados, se pretende identificar las prácticas más adecuadas y fomentar el monitoreo continuo de la vegetación y el suelo. Este enfoque permitirá generar información útil para futuros proyectos, facilitando la selección de especies vegetales con potencial de establecimiento y el desarrollo de una comunidad diversa, estructurada y con condiciones edáficas que sustenten su equilibrio a largo plazo.

Objetivo General

Evaluar los efectos de la restauración ecológica en la recuperación de plantas leñosas en cuatro sitios restaurados de la cantera de extracción minera y sus efectos en las propiedades del suelo.

Objetivos Específicos

1. Comparar la estructura y composición de plantas leñosas entre los sitios Restaurados y el Conservado.
2. Evaluar el desempeño de las plantas leñosas en los sitios Restaurados.
3. Evaluar propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas del suelo de los sitios Restaurados considerando la estacionalidad.
4. Evaluar propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas del suelo de los sitios Restaurados, en comparación con el sitio Conservado y el sitio Perturbado.
5. Evaluar la relación entre la estructura, composición y desempeño de plantas leñosas y las propiedades físicas y químicas del suelo en los sitios Restaurados considerando la estacionalidad de las lluvias.

Hipótesis

1. La estructura y composición de las plantas leñosas en los sitios Restaurados serán diferentes a las del sitio Conservado.
2. En los sitios Restaurados, las especies leguminosas y pioneras presentarán diferente desempeño (sobrevivencia y crecimiento) que las no leguminosas y no pioneras.
3. Las propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas de los suelos variarán después de seis meses de lluvias.
4. A menos de ocho años del cambio de uso del suelo por actividades mineras, las propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas del suelo serán diferentes entre los sitios Restaurados, el Conservado y el Perturbado.
5. Las variables de estructura, composición y desempeño estarán influenciadas por las propiedades físicas y químicas del suelo y la estacionalidad.

Predicciones

1. La densidad de plantas, especies, árboles, arbustos, leguminosas y no leguminosas será menor en los sitios Restaurados en comparación con el sitio Conservado.
2. En los sitios Restaurados, las especies leguminosas y pioneras tendrán mayor sobrevivencia y crecimiento que las no leguminosas y no pioneras.
3. Después de seis meses de lluvias, el contenido gravimétrico de agua del suelo y el pH aumentarán mientras que, el resto de las propiedades del suelo disminuirán su magnitud.
4. Los suelos en los sitios Restaurados presentarán mayor pedregosidad y densidad aparente, y menor profundidad, contenido gravimétrico de agua, carbono orgánico, nitrógeno orgánico e inorgánico, fósforo total y disponible y pH más ácido en comparación con el sitio Conservado.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en una cantera de extracción de roca caliza. La cantera ha estado en explotación durante 21 años **(CEMOSA, 2015)**. El área de estudio tiene un rango de altitud de 1605 a 1650 m (**Tabla 1**), presenta pendientes superiores a 45° que lo hacen susceptible a la erosión **(Gobierno del Estado de Morelos y CEAMA, 2008)** y la vegetación nativa del lugar fue eliminada para la explotación del terreno. La cantera se encuentra al oeste de la Reserva Estatal Sierra de Monte Negro (RESMN, 18.791042 N, -99.155190 O). El clima es cálido-subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 23.2 ± 0.1 °C y la precipitación total anual de 963.7 ± 25.8 mm. Los suelos son rendzinas derivadas de roca caliza **(González-Chévez y Flores-Díaz, 2020)**. El ecosistema original del área de estudio corresponde a SBC. La SBC se caracteriza por su marcada estacionalidad en las lluvias, con una época de lluvias (de mayo a octubre) y una época de secas (de noviembre a abril) (**Figura 1**) **(Miranda y Hernández-X, 1963; Rzedowski, 1978 y Trejo y Dirzo, 2000)**.

Tabla 1. Características de los sitios muestreados.

Sitios	Año de establecimiento	Edad (años)	Altitud (m)
Conservado	-	-	1650
Perturbado	2023	1	1605
ER-7	2016	7	1648
ER-6	2017	6	1628
ER-5	2018	5	1625
ER-3	2020	3	1617

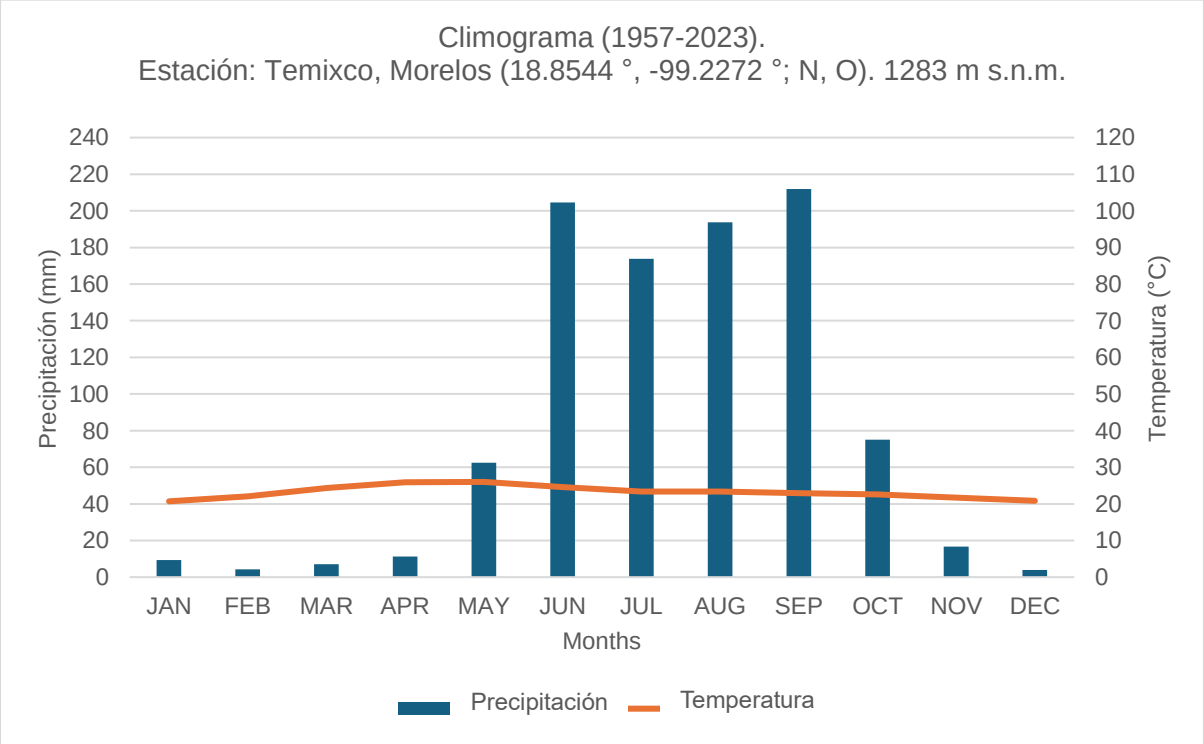


Figura 1.Climograma (1957-2023). Datos de la Estación Climatológica Temixco (CONAGUA), estado de Morelos, México.

La cantera de roca caliza cuenta con permisos de operación y autorizaciones de extracción y de ampliación (fecha de autorización 23 de febrero del 2010, SEMARNAT) con una duración de 99 años. Como parte de las medidas de mitigación indicadas por la SEMARNAT se establecieron 11 condicionantes, una de ellas es el diseño de un programa de restauración ecológica y otra el seguimiento científico por parte de un equipo de supervisión ambiental **(CEMOSA, 2015)**. A partir del año 2015, se inició el diseño de un proyecto de restauración ecológica como parte del cumplimiento de las condicionantes para mitigar el impacto ambiental asociado a la extracción de roca caliza **(CEMOSA, 2015)** y ha tenido continuación hasta 2023. Como parte del proyecto de restauración, se propuso llevar a cabo la reforestación de la zona con una densidad de 1 200 árboles por hectárea una vez concluida la extracción en cada piso de la cantera **(CEMOSA, 2010)**. A partir del 2015, el equipo de supervisión ambiental de la UAEM propuso que CEMOSA iniciara las acciones de restauración a lo largo de los 99 años y no al final de la extracción como se establece en el resolutivo. A partir del 2016 se implementaron acciones de restauración ecológica en los pisos superiores correspondientes a las acciones de restauración ecológica iniciadas en 2016, 2017, 2018 y 2020 sobre los cuales había terminado la explotación y que se encuentran contiguas a la zona de amortiguamiento y a su vez al límite con la RESMN por un lado y con la zona perturbada por el otro. La empresa no nos definió la densidad, identidad ni edad de las especies que usaron en cada sitio restaurado. Solamente nos dijeron que en cada año escogían las especies en función de su disponibilidad en el vivero. En este estudio lo que queremos es precisamente informar sobre lo que hizo la empresa en los sitios restaurados a partir de lo que medimos en el 2023. La Tabla I muestra información correspondiente a cada uno de estos sitios.

Diseño experimental

Sitios muestreados

Para cada objetivo del estudio, se midieron diferentes variables en distintos sitios: el sitio Conservado (1650 m) y el sitio Perturbado (1605 m) por minería, tomados como controles, y cuatro sitios Restaurados dentro de la cantera: ER-7 (1648 m), ER-6 (1628 m), ER-5 (1625 m) y ER-3 (1617 m). Estos nombres corresponden a los años transcurridos desde iniciada la restauración en cada uno de ellos, siendo ER-7 el más antiguo y ER-3 el más reciente.

Estructura y Composición de plantas leñosas

Se evaluaron cinco sitios: los cuatro Restaurados y el Conservado, tomado como referencia. El sitio Perturbado no fue considerado debido a la ausencia total de vegetación.

En cada sitio, se establecieron tres parcelas (N = 15) de **18 × 5 m**, separadas por **30** m en los Restaurados y 40 m en el Conservado, dado que este último es más extenso y permitió una mejor distribución de parcelas.

Se censaron todas las plantas leñosas para calcular su abundancia y densidad por metro cuadrado. Las especies fueron identificadas con apoyo del taxónomo M. en C. Gabriel Flores Franco (curador del herbario HUMO del CIByC-UAEM) y clasificadas por hábito (árboles, arbustos), grupo funcional (leguminosas, no leguminosas) y estado sucesional (pioneras, no pioneras).

Dado que no hubo diferencias significativas en estructura y composición entre los sitios Restaurados, estos se agruparon bajo una misma categoría (N = 12) para compararlos con el sitio Conservado (N = 3).

El estudio se realizó en dos estaciones: seca (28 de marzo de 2023) y lluvia (6 de septiembre de 2023). Como no se encontraron diferencias significativas entre estaciones, el número de muestras se duplicó a N = 6 en el Conservado y N = 24 en los Restaurados, mejorando la evaluación de estructura y composición.

Desempeño de plantas leñosas

Este análisis solo incluyó los sitios Restaurados. En cada uno se establecieron tres parcelas (N = 12), separadas por 30 m. Se evaluó la sobrevivencia de árboles, arbustos, leguminosas, no leguminosas, pioneras y no pioneras, midiendo cuántas plantas persistieron seis meses después, entre estación seca y lluviosa.

También se analizó la sobrevivencia de las diez especies mejor representadas en cuanto a número de plantas y se midió el diámetro basal y la altura al meristemo apical en las dos estaciones. El crecimiento se analizó por grupos:

- Árboles → Se midió la ganancia en volumen con la fórmula:

  $V = \frac{1}{3} h\pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2$; donde *h* es la altura y *d* el diámetro basal.

- Arbustos → Se midió el incremento en altura y diámetro basal por separado.

Las mediciones se realizaron con un vernier de precisión (0.05 mm) y una cinta métrica (±1 mm).

Las variables de sobrevivencia y crecimiento se agruparon en una sola categoría para comparar los sitios Restaurados (N = 12).

Las variables de sobrevivencia y crecimiento de los sitios restaurados se agruparon en una misma categoría (sitios Restaurados) para evaluarlas luego de seis meses de lluvias.

Propiedades del suelo

Se establecieron seis sitios: los cuatro Restaurados, el Conservado y el Perturbado. En cada sitio, se definieron tres parcelas de 18 × 5 m, separadas por 30 m en los Restaurados y 40 m en el Conservado.

En cada parcela se tomaron tres muestras de suelo (N = 108) de los primeros 10 cm de profundidad, separadas 5 m entre sí y a 4 m del borde de la parcela.

Análisis de las propiedades físicas y fisicoquímicas del suelo

Las muestras se recolectaron con un cilindro de acero inoxidable, (74.8 cm³, 5.4 cm de altura, 4.2 cm de diámetro) para determinar densidad aparente y contenido gravimétrico de agua. Se midió la profundidad del suelo con una regla (±1 mm), considerando como límite la roca madre, y la pedregosidad se determinó siguiendo la clasificación del manual de **Siebe et al. (2006)**.

Las muestras se analizaron en el Laboratorio II de Biología Integrativa (CIByC-UAEM). El peso seco se obtuvo tras cinco días a 105°C en una estufa Binder y se determinó con una balanza de precisión 0.01 g.

La densidad aparente (DA) y el contenido gravimétrico de agua (CGA) se calcularon con las siguientes ecuaciones:

$$DA = \frac{PS}{74.8cm^3} \qquad [1]$$

$$CGA = \frac{(PF-PS)}{PS} * 100\% \qquad [2]$$

donde PS es el peso seco y PF el peso fresco de la muestra.

Análisis de las propiedades químicas del suelo

Se tomaron 300 g de suelo libre de fragmentos de rocas y el análisis se realizó en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental de Cementos Moctezuma. Se evaluaron:

- pH en H_2O (1:2) **(Thomas, 1996)**.
- Concentración total de carbono (Ct): mediante analizador TOC (carbono orgánico + carbono inorgánico) con analizador automatizado TOC (SSM 5050A Shimadzu) **(Nelson y Sommers, 1996)**.
- Concentración total de nitrógeno (Nt): método Kjeldahl **(Bremner, 1996)**.
- Concentración de nitrógeno inorgánico (NO_3^-, NH_4^+): Destilación por arrastre de vapor **(Keeney y Nelson, 1982)**.
- Concentración total de fósforo (Pt): Digestión con HNO_3:$HClO_4$ 2:1, colorimetría amarillo vanadomolibdico **(Olsen y Sommers, 1982)**.
- Concentración de fósforo disponible (Pa): colorimetría azul de molibdeno **(Murphy y Riley, 1962)**.

También se calcularon las siguientes relaciones según los datos obtenidos del procesamiento químico de las muestras de suelo.

- Relación C:N
- Relación NO_3^-:NH_4^+

Para evaluar la variabilidad estacional del suelo luego de seis meses de lluvias, se agruparon los sitios Restaurados (N = 36) y se analizaron las propiedades del suelo.

Debido a que no se encontraron diferencias significativas en cuanto a la variación de la mayoría de las propiedades del suelo entre sitios con el cambio de estación, el número de muestras por sitio se duplicó a N = 18.

Relación Planta-Suelo

Las tres muestras de suelo de cada parcela en los Restaurados se promediaron en una muestra compuesta (N = 12 por estación).

Se realizaron cuatro análisis de componentes principales (ACP) para ordenar 12 variables de suelo superficial (0-10 cm), separadas en:

- Físicas: profundidad, pedregosidad, densidad aparente, contenido gravimétrico de agua.
- Químicas: pH, capacidad de intercambio catiónico (CE), carbono total (Ct), nitrógeno orgánico (Nt), relación C:N, relación NO_3^-:NH_4^+, fósforo total (Pt) y fósforo disponible (Pa).

Análisis estadístico

Se verificó la normalidad de los datos con Shapiro-Wilks y la homocedasticidad con Levene. Como ninguna variable cumplió los supuestos paramétricos, se aplicaron pruebas no paramétricas:

- Mann-Whitney U → Comparación de estructura y composición entre sitios.
- Prueba exacta de Fisher → Análisis de sobrevivencia por especie.
- Log-Rank → Análisis de sobrevivencia por grupo funcional y estado sucesional.
- Kruskal-Wallis y Tukey a posteriori → Comparación de propiedades del suelo entre sitios.
- Mann-Whitney U → Comparación de propiedades del suelo entre estaciones.
- Análisis de Componentes Principales → Reducción de la dimensionalidad de las variables de suelo.
- Correlaciones entre las propiedades del suelo y la estructura, composición y el desempeño de las plantas leñosas.

La prueba exacta de Fisher se realizó en RStudio y el resto de los análisis se realizaron con STATISTICA, en ambos casos se empleó un nivel de significancia de 0.05.

Resultados

Estructura y Composición de especies leñosas

En el presente estudio, se analiza la estructura y composición de las plantas leñosas en los sitios Restaurados y su comparación con el sitio Conservado de SBC para evaluar el éxito de los procesos de restauración y su similitud con las condiciones del sitio Conservado. Las especies se clasificaron según su familia, grupo funcional (leguminosas y no leguminosas), hábito de crecimiento (árboles y arbustos) y estado sucesional (pioneras y no pioneras) (**Tabla 2**). Para analizar la estructura, se consideró la densidad de plantas, mientras que la composición se evaluó a partir de las densidades de especies, hábitos de crecimiento y grupos funcionales (**Tabla 3**). En los sitios Restaurados, también se registró la abundancia de especies según su hábito, grupo funcional y estado sucesional para caracterizar su presencia (**Tabla 2**).

En los sitios Restaurados se registraron un total de 12 familias de las cuales, el grupo funcional de las leguminosas (Fabaceae) estuvo representado por 81 individuos pertenecientes a 18 especies (ver **Tabla 2**). El grupo funcional de las no leguminosas estuvo representado con 11 familias con un total de 107 individuos pertenecientes a 18 especies (**ver Tabla 2**).

Entre el sitio Conservado y los sitios Restaurados existen un total de siete especies compartidas (13% del total). Estas son *Croton ciliatoglandulifer*, *Dodonaea viscosa*, *Eysenhardthia polystachya*, *Lysiloma divaricatum*, *Mimosa tricephala*, *Senna holwayana* y *Verbesina auriculata* **(Anexo 1)**.

Existen 17 especies que solo se encontraron en el sitio Conservado (el 32% del total). Estas son *Brahea dulcis*, *Eremosis corymbosa*, *Tecoma stants*, *Pristimera celastroides*, *Salvia sessei*, *Bunchosia caniscens*, *Galphimia glauca*, *Malpighia mexicana*, *Haematoxylum brasiletto*, *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia*, *Alvaradoa amorphoides*, *Colubrina triflora*, *Zanthoxylum fagara*, *Sideroxylon capiri*, *Celtis caudata* y *Lippia origanoides* **(Anexo 1)**.

Dentro de los sitios Restaurados destaca la familia Convolvulaceae con 42 individuos (**Tabla 2**) representada por las especies *Ipomoea arborescens* y *Ipomoea pauciflora*. También destaca la especie *Croton ciliatoglandulifer* con 13 individuos dentro de la familia Euphorbiaceae (**Tabla 2**). La familia Asteraceae presentó mayor diversidad que las anteriores con especies como *Barkleyanthus salicifolius*, *Pluchea carolinensis* y *Verbesina auriculata*. Esta última especie llegó a presentar 19 individuos en el sitio Conservado (**Tabla 2**). La familia Sapindaceae estuvo representada por la especie *Dodonaea viscosa* y la familia Solanaceae con casi todos sus individuos pertenecientes a la especie *Solanum eriathum* (**Tabla 2**). Todas estas especies son representativas de SBC con lo cual se aprecia que los sitios Restaurados, a pesar de encontrarse en etapas tempranas de la sucesión natural, se parecen en cuanto a composición, al sitio Conservado gracias a la restauración que está realizando la empresa.

Tabla 2. Abundancia de especies leñosas compartidas entre los sitios Restaurados y el Conservado clasificadas por grupo funcional (GF), hábito (H) y estado sucesional (ES) así como la familia a la que pertenecen. Datos obtenidos en temporada seca (marzo/2023).

Familias	Especies	GF	H	ES	ER-7	ER-6	ER-5	ER-3	C
Fabaceae	*Conzattia multiflora* (B.L.Rob.) Standl.	Leguminosa	Árbol	No Pionera	1	0	0	0	0
	Coulteria platyloba (S.Watson) N.Zamora	Leguminosa	Árbol	No Pionera	2	0	1	0	0
	Dalea leptostachya DC.	Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	0	2	17	0
	Erythrina americana Mill.	Leguminosa	Árbol	No Pionera	0	1	2	0	0
	Eysenhardthia polystachya (Ortega) Sarg.	Leguminosa	Árbol	No Pionera	3	0	1	1	1
	Gliricidia sepium (Jacq.) Kunth	Leguminosa	Árbol	Pionera	0	0	0	4	0
	Indigofera platycarpa Rose	Leguminosa	Arbusto	Pionera	4	5	0	0	0
	Lysiloma acapulcense (Kunth) Benth.	Leguminosa	Árbol	No Pionera	1	0	0	0	0
	Lysiloma divaricatum (Jacq.) J.F.Macbr.	Leguminosa	Árbol	No Pionera	3	0	0	3	4
	Mimosa benthamii J.F.Macbr.	Leguminosa	Arbusto	Pionera	2	1	1	2	0
	Mimosa lacerata Rose	Leguminosa	Arbusto	Pionera	2	0	0	0	0
	Mimosa polyantha Benth.	Leguminosa	Arbusto	Pionera	5	1	1	3	0
	Mimosa tricephala Schltdl. & Cham. var. tricephala	Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	0	1	0	2
	Pithecellobium dulce (Roxb.) Benth.	Leguminosa	Árbol	Pionera	1	3	2	0	0
	Senna hirsuta (L.) H.S.Irwin & Barneby	Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	0	0	2	0
	Senna holwayana (Rose) H.S.Irwin & Barneby	Leguminosa	Arbusto	No Pionera	1	0	0	1	3
	Vachellia campeachiana (Mill.) Seigler & Ebinger	Leguminosa	Arbusto	Pionera	2	1	0	1	0
	Vachellia farnesiana (L.) Wight & Arn.	Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	0	2	0	0
Anacardiaceae	*Spondias purpurea* L.	No Leguminosa	Arbusto	No Pionera	0	0	1	0	0
Asparagaceae	*Agave angustifolia* Haw.	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	2	0	0	0
Asteraceae	*Barkleyanthus salicifolius* (Kunth) H.Rob. & Brettell	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	1	3	0	0	0
	Pluchea carolinensis (Jacq.) G.Don	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	1	1	3	0
	Verbesina auriculata DC.	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	4	0	0	19
Boraginaceae	*Wigandia urens* (Ruiz & Pav.) Kunth	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	0	3	0	0
Cactaceae	*Opuntia* sp. Mill.	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	1	0	0	0
Convolvulaceae	*Ipomoea arborescens* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) G.Don	No Leguminosa	Árbol	Pionera	1	1	1	23	0
	Ipomoea pauciflora M.Martens & Galeotti	No Leguminosa	Árbol	Pionera	1	8	3	4	0
Euphorbiaceae	*Croton ciliatoglandulifer* Ortega	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	0	5	8	11
	Euphorbia tanquahuete Sessé & Moc.	No Leguminosa	Árbol	Pionera	0	0	2	0	0
Malvaceae	*Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britten & Baker f.	No Leguminosa	Árbol	No Pionera	1	0	1	0	0
	Heliocarpus terebinthinaceus (DC.) Hochr.	No Leguminosa	Árbol	Pionera	0	0	3	0	0
	Waltheria indica L.	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	0	1	0	0
Moraceae	*Ficus insipida* Willd.	No Leguminosa	Árbol	No Pionera	0	1	0	0	0
Sapindaceae	*Dodonaea viscosa* Jacq.	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	4	4	0	5	14
Solanaceae	*Nicotiana glauca* Graham	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	1	0	0	0
	Solanum eriathum D.Don	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	0	8	0	3	0
12 familias	**36 especies**	**18 L | 18 NL**	**14 Á | 22 Ar**	**26 P | 10 NP**	**35**	**46**	**34**	**80**	**54**
						188 plantas			

De las 36 especies en los sitios Restaurados, 14 son árboles y 22 son arbustos, representando un 39% y 61% respectivamente (**Tabla 2**). En cuanto al estado sucesional, 26 especies son pioneras y 10 especies son no pioneras (**Tabla 2**), representando un 72% y 28% respectivamente.

Las especies con mayor número de individuos fueron *Ipomoea arborescens* (N=26), *Dalea leptostachya* (N=19), *Ipomoea pauciflora* (N=16), *Croton ciliatoglandulifer* (N=13), *Dodonaea viscosa* (N=13), *Solanum eriathum* (N=11). De ellas, solo *Dalea leptostachya* pertenece al grupo funcional de las leguminosas, el resto, son especies no leguminosas.

La densidad de plantas, especies, hábitos y grupos funcionales son diferentes entre cada sitio de estudio (**Tabla 3**).

Tabla 3. Estructura y composición de plantas leñosas en cada sitio. Se muestran la media y el error estándar, así como la mediana y los rangos intercuartílicos (IQR) junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney (U = 144, p < 0.001). Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios. Los cuatro sitios restaurados están agrupados bajo la categoría "Restaurados".

Variables	Densidad (x/m^2)	Conservado (N = 6)	Restaurados (N = 24)	p
Estructura	Plantas	0.33 **a** ± 0.03 0.32 (IQR:0.27-0.37)	0.01 **b** ± 0.007 0.01 (IQR:0.007-0.016)	p < 0.001
Composición	Especies	0.13 **a** ± 0.01 0.12 (IQR:0.11-0.13)	0.01 **b** ± 0.002 0.006 (IQR:0.005-0.008)	p < 0.001
	Árboles	0.08 **a** ± 0.01 0.08 (IQR:0.07-0.09)	0.002 **b** ± 0.01 0.003 (IQR:0.001-0.004)	p < 0.001
	Arbustos	0.25 **a** ± 0.03 0.23 (IQR:0.22-0.28)	0.01 **b** ± 0.006 0.008 (IQR:0.005-0.013)	p < 0.001
	Leguminosas	0.07 **a** ± 0.02 0.05 (IQR:0.04-0.12)	0.01 **b** ± 0.00 0.006 (IQR:0.003-0.009)	p < 0.001
	No Leguminosas	0.26 **a** ± 0.03 0.24 (IQR:0.20-0.29)	0.01 **b** ± 0.007 0.005 (IQR:0.002-0.01)	p < 0.001

Desempeño en los Sitios Restaurados

Sobrevivencia por Especies

De las 36 especies registradas en los sitios Restaurados, 16 especies tuvieron menos de tres individuos (44% de la muestra). Estas especies no fueron consideradas para el análisis de desempeño de leñosas. De las 20 especies restantes, se escogieron las 10 especies más abundantes para realizar el análisis de sobrevivencia por especie (N=10).

En los sitios Restaurados la especie leguminosa *Pithecellobium dulce* presentó la mayor sobrevivencia luego de seis meses de lluvia (**Tabla 4**). Los seis individuos censados en la estación seca sobrevivieron en estación lluviosa. Esta especie no fue censada en el sitio Conservado. Por encima del 90% de sobrevivencia se encuentran las no leguminosas *Ipomoea pauciflora* (94%) y *Croton ciliatoglandulifer* (92%) (**Tabla 4**), esta última especie presente también en el sitio Conservado. Las leguminosas *Mimosa benthamii* y *Lysiloma divaricatum* presentaron un 83% de sobrevivencia (**Tabla 4**), esta última especie presente también en el sitio Conservado. La leguminosa *Indigofera platycarpa* fue la única especie que no sobrevivió (**Tabla 4**) de las 10 especies utilizadas para el análisis de sobrevivencia. Los nueve individuos de esta especie censados en la estación seca murieron luego de 6 meses de lluvias. En este primer periodo, la Sobrevivencia Global de las Especies en los sitios Restaurados fue de 86%, que representa a 133 individuos vivos con el 71% de sobrevivencia.

Tabla 4. Sobrevivencia de las especies leñosas más abundantes encontradas en los sitios Restaurados después de seis meses. Las especies están agrupadas por grupo funcional (GF), hábito (H) y estado sucesional (ES). Se presentan los resultados de la prueba exacta de Fisher (p = 0.0005; dos colas) y el número de plantas leñosas (N).

Especies	GF	H	ES	Sobrevivencia (%)	N
Croton ciliatoglandulifer	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	92%	13
Dalea leptostachya	Leguminosa	Arbusto	Pionera	63%	19
Dodonaea viscosa	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	62%	13
Indigofera platycarpa	Leguminosa	Arbusto	Pionera	0%	9
Ipomoea arborescens	No Leguminosa	Árbol	Pionera	69%	26
Ipomoea pauciflora	No Leguminosa	Árbol	Pionera	94%	16
Lysiloma divaricatum	Leguminosa	Árbol	No Pionera	83%	6
Mimosa benthamii	Leguminosa	Arbusto	Pionera	83%	6
Pithecellobium dulce	Leguminosa	Árbol	Pionera	100%	6
Solanum eriathum	No Leguminosa	Arbusto	Pionera	36%	11

$p = 0.0005$

Análisis por Grupos

Sobrevivencia

No existieron diferencias significativas entre leguminosas (71%) y no leguminosas (73%; **Figura 2A**), sin embargo, la sobrevivencia de no pioneras (85%) fue significativamente mayor que la de las pioneras (68%; **Figura 2B**).

Crecimiento

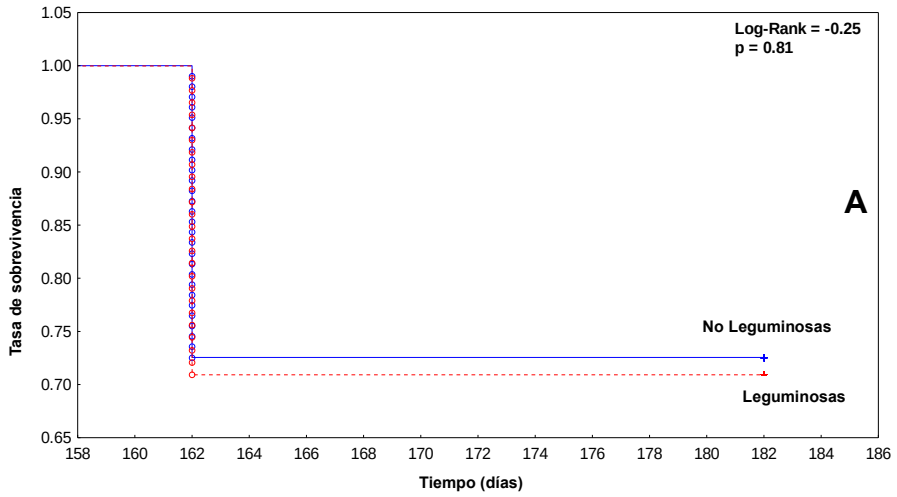
Las **Tablas 5, 6 y 7** muestran los promedios de crecimiento de árboles y arbustos agrupados según su grupo funcional y estado sucesional.

Dentro de los árboles, la ganancia en volumen es similar según el grupo funcional y el estado sucesional (**Tabla 5**).

Dentro de los arbustos, la ganancia en altura de las especies leguminosas fue mayor que la alcanzada por las especies no leguminosas (**Tabla 6**), sin embargo, la ganancia en altura de las especies pioneras fue similar a la de las especies no pioneras (**Tabla 6**).

Dentro de los arbustos, la ganancia en diámetro de las especies leguminosas fue mayor que la alcanzada por las especies no leguminosas (**Tabla 7**), sin embargo, la ganancia en diámetro basal de las especies pioneras fue similar a la de las especies no pioneras (**Tabla 7**).

De las **Tablas 6 y 7** se deduce que los arbustos leguminosos presentaron mayor crecimiento que los no leguminosos y que el crecimiento según el estado sucesional, es similar en cuanto a pioneros y no pioneros.



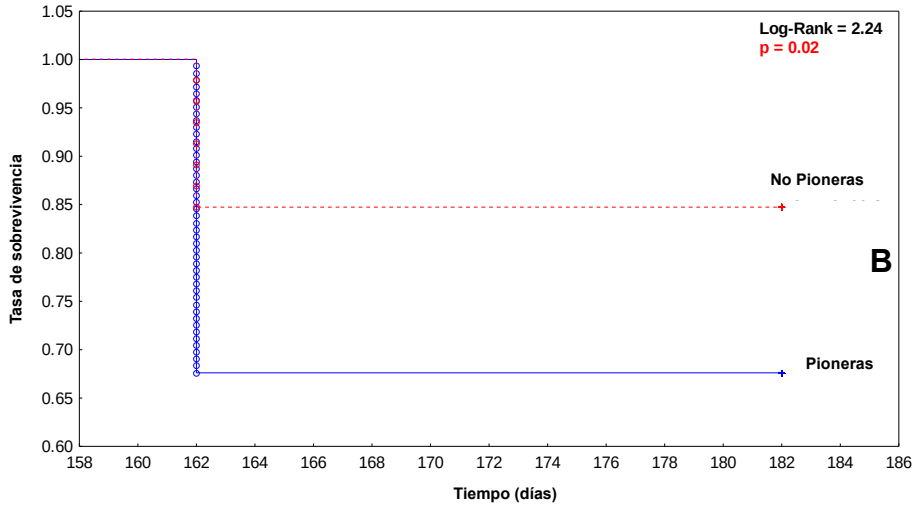


Figura 2. Tasa de sobrevivencia de plantas leñosas encontradas en los sitios Restaurados después de seis meses agrupadas por: Grupo Funcional (A) y Estado Sucesional (B). Se muestran los resultados de la prueba Log-Rank ($p < 0.05$).

Tabla 5. Ganancia en volumen de árboles encontrados en los sitios Restaurados después de seis meses agrupados por grupo funcional (GF) y estado sucesional (ES). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney ($p < 0.05$). También se presenta el número de plantas leñosas medidas (N).

Ganancia en Volumen (cm^3)		N	U	p
GF	Leguminosas: 3250 **a** ± 2573 No Leguminosas: 521 **a** ± 161	Leguminosas: 21 No Leguminosas: 16	119	0.14
ES	Pioneras: 455 **a** ± 165 No Pioneras: 3053 **a** ± 2349	Pioneras: 14 No Pioneras: 23	123	0.24

Tabla 6. Ganancia en altura de arbustos encontrados en los sitios Restaurados después de seis meses agrupados por grupo funcional (GF) y estado sucesional (ES). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney ($p < 0.05$). También se presenta el número de plantas leñosas medidas (N).

Ganancia en Altura (cm)		N	U	p
GF	Leguminosas: 29.77 **a** ± 5.08 No Leguminosas: 16.96 **b** ± 3.57	Leguminosas: 22 No Leguminosas: 25	1.96	0.05
ES	Pioneras: 22.81 **a** ± 3.21 No Pioneras: 24.20 **b** ± 8.88	Pioneras: 42 No Pioneras: 5	97	0.8

Tabla 7. Ganancia en diámetro basal de arbustos encontrados en los sitios Restaurados después de seis meses agrupados por grupo funcional (GF) y estado sucesional (ES). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney ($p < 0.05$). También se presenta el número de plantas leñosas medidas (N).

Ganancia en Diámetro (cm)		N	U	p
GF	Leguminosas: 1.10 **b** ± 0.29 No Leguminosas: 0.38 **a** ± 0.89	Leguminosas: 27 No Leguminosas: 12	8.5	0.03
ES	Pioneras: 1.31 **a** ± 0.37 No Pioneras: 0.76 **a** ± 0.27	Pioneras: 35 No Pioneras: 7	118	0.9

Caracterización de los Suelos

Variación Estacional

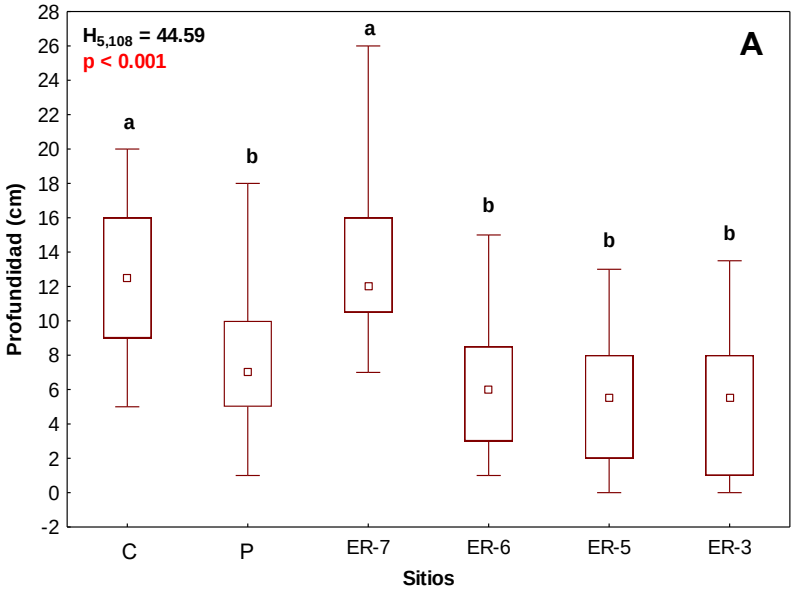
En los sitios Restaurados el contenido gravimétrico de agua, la densidad aparente del suelo, así como el carbono total, la concentración de nitrato y la relación NO_3^-:NH_4^+fueron mayores en estación de lluvia que en la estación seca (**Tabla 8**).

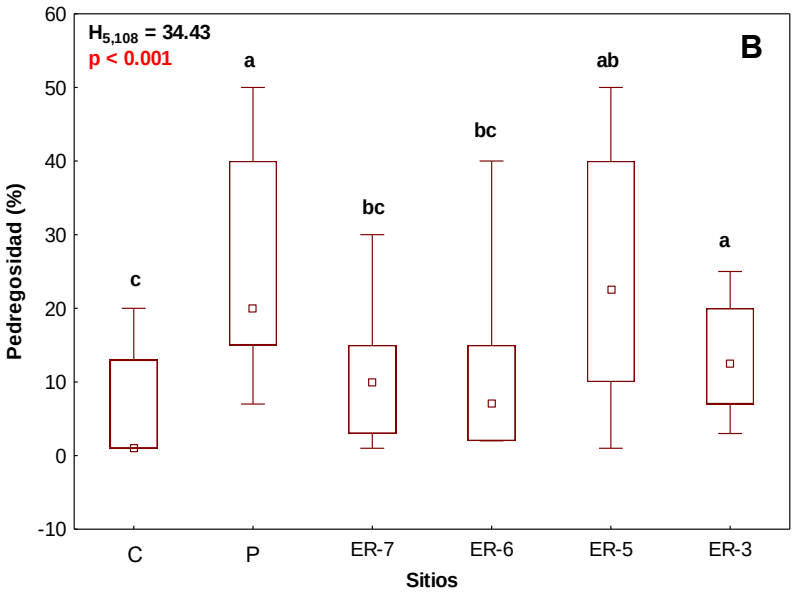
Tabla 8. Propiedades de suelo por estación en los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 36). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba U de Mann-Whitney. Letras diferentes indican diferencias significativas entre estaciones (p < 0.05).

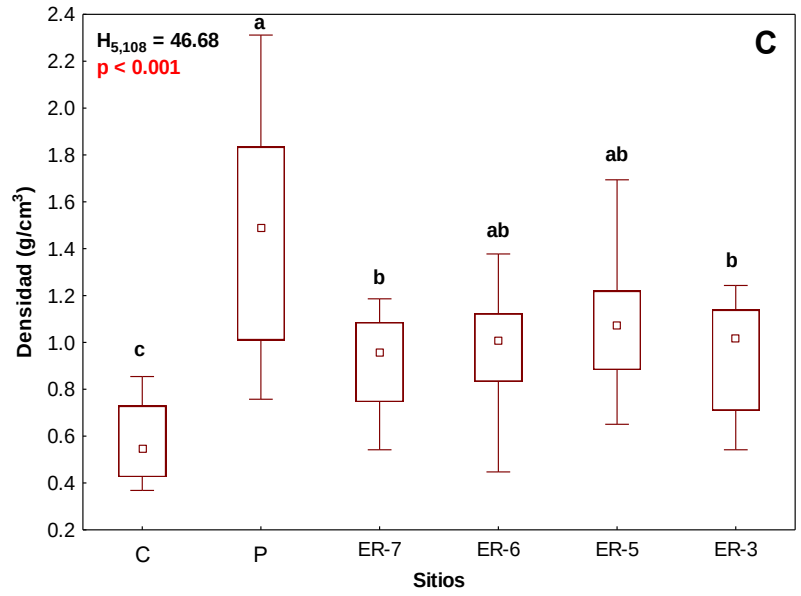
Propiedades	Estaciones		U	p
	Seca	Lluvia		
Densidad (mg/cm^3)	1.13 **a** ± 0.03	0.84 **b** ± 0.03	164	< 0.001
CGA (%)	3.4 **b** ± 0.19	21.8 **a** ± 1.69	1.0	< 0.001
pH	8.0 **a** ± 0.11	8.2 **a** ± 0.06	581	0.45
Ct (%)	7.0 **a** ± 0.39	17.1 **a** ± 3.02	499	0.09
Nt (%)	0.19 **a** ± 0.02	0.15 **a** ± 0.02	528	0.18
Relación C:N	13.1 **a** ± 0.53	14.6 **a** ± 0.74	531	0.45
NO_3^- (µg/g)	16.5 **b** ± 1.42	32.1 **a** ± 2.98	258	< 0.001
NH_4^+ (µg/g)	16.1 **a** ± 0.79	15.7 **a** ± 0.75	639	0.92
Relación NO_3^-:NH_4^+	1.06 **b** ± 0.11	2.04 **a** ± 0.14	138	< 0.001
Pt (µg/g)	0.07 **a** ± 0.01	0.08 **a** ± 0.01	622	0.77
Pa (µg/g)	10.9 **a** ± 1.51	13.9 **a** ± 2.82	582	0.46

Efectos del cambio de uso del suelo y de los tratamientos de restauración ecológica

Las propiedades físicas de los suelos de los sitios Restaurados presentan diferencias significativas con respecto al sitio Conservado. Para la profundidad, ER-7 presentó valores similares a los encontrados en el sitio Conservado y diferentes a los del Perturbado (**Figura 3A, Tabla 9**). El resto de los sitios presentó un comportamiento contrario (**Figura 3A, Tabla 9**). En pedregosidad, ER-7 y ER-6 fueron similares al sitio Conservado y diferentes al Perturbado, mientras que la pedregosidad en ER-5 fue similar a la del sitio Perturbado y diferente a la del Conservado y ER-3 presentó semejanzas con ambos sitios de referencia (**Figura 3B, Tabla 9**). En densidad aparente, todos los sitios Restaurados fueron diferentes del sitio Conservado y similares al Perturbado (**Figura 3C, Tabla 9**). En contenido gravimétrico de agua (CGA), todos los sitios Restaurados son semejantes a ambos sitios de referencia (**Figura 3D, Tabla 9**).


A
$H_{5,108}$ = 44.59
p < 0.001
Profundidad (cm)
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
-2
a
b
a
b
b
b
C
P
ER-7
ER-6
ER-5
ER-3
Sitios


B
$H_{5,108}$ = 34.43
p < 0.001
Pedregosidad (%)
60
50
40
30
20
10
0
-10
c
a
bc
bc
ab
a
C
P
ER-7
ER-6
ER-5
ER-3
Sitios


C
$H_{5,108}$ = 46.68
p < 0.001
Densidad (g/cm^3)
2.4
2.2
2.0
1.8
1.6
1.4
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
c
a
b
ab
ab
b
C
P
ER-7
ER-6
ER-5
ER-3
Sitios

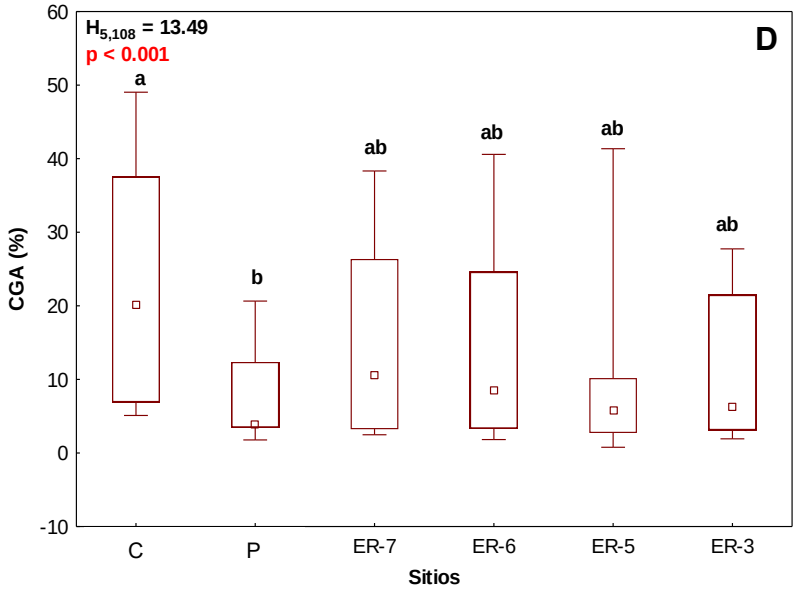


Figura 3. Propiedades físicas del suelo: Profundidad (A), Pedregosidad (B), Densidad Aparente (C) y Contenido Gravimétrico de Agua (D; CGA) en los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05).

Tabla 9. Propiedades físicas del suelo: Profundidad, Pedregosidad, Densidad Aparente y Contenido Gravimétrico de Agua (CGA) en los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios.

Sitios	Profundidad (cm)	Pedregosidad (%)	Densidad (g/cm³)	CGA (%)
Conservado	12.9 **a** ± 0.94	5.9 **c** ± 1.76	0.57 **c** ± 0.04	23.3 **a** ± 4.17
Perturbado	7.9 **b** ± 1.00	27.7 **a** ± 3.72	1.48 **a** ± 0.11	7.6 **b** ± 1.41
ER-7	13.3 **a** ± 1.12	10.1 **bc** ± 1.96	0.93 **b** ± 0.05	14.1 **ab** ± 2.84
ER-6	6.3 **b** ± 1.00	10.9 **bc** ± 2.82	0.97 **ab** ± 0.05	14.9 **ab** ± 3.14
ER-5	5.3 **b** ± 0.93	23.2 **ab** ± 3.86	1.10 **ab** ± 0.07	10.2 **ab** ± 2.85
ER-3	5.2 **b** ± 0.92	12.7 **a** ± 1.63	0.94 **b** ± 0.05	11.2 **ab** ± 2.25

El pH es más ácido en los suelos del sitio Conservado (7.39 ± 0.06) que en los del sitio Perturbado (8.29 ± 0.08) (**Figura 4; Tabla 10**). De los Sitios Restaurados, ER-7, ER-6 y ER-5 presentan un pH similar al del sitio Perturbado, mientras que solo ER-3 muestra un pH comparable al del sitio Conservado aunque este sitio presentó la mayor variación en comparación con el resto (**Figura 4; Tabla 10**).

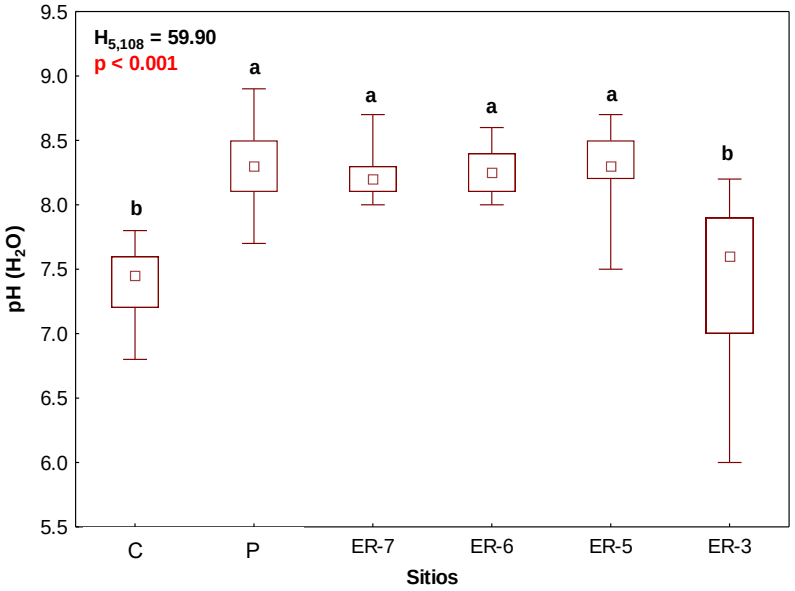


Figura 4. pH del suelo de los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05).

Tabla 10. pH del suelo de los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05).

Sitios	pH (H_2O)
Conservado	7.4 **b** ± 0.06
Perturbado	8.3 **a** ± 0.08
ER-7	8.2 **a** ± 0.05
ER-6	8.3 **a** ± 0.04
ER-5	8.3 **a** ± 0.06
ER-3	7.4 **b** ± 0.16

El carbono orgánico total del suelo (Ct) fue mayor en promedio en el sitio Conservado (23.36 ± 2.01%) que en el sitio Perturbado (10.08 ± 0.17%), aunque no se observaron diferencias significativas entre ambos sitios (**Figura 5A; Tabla 11**). De los sitios Restaurados, solo ER-7 presenta valores similares a los encontrados tanto en el sitio Conservado como en el Perturbado, mientras que ER-3 es similar al sitio Perturbado (**Figura 5A; Tabla 11**). ER-6 y ER-5 mostraron menor concentración de carbono orgánico que la registrada en el sitio Perturbado (**Figura 5A; Tabla 11**).

El nitrógeno orgánico total del suelo (Nt) fue mayor en promedio en el sitio Conservado (0.87 a ± 0.05%) y menor en el sitio Perturbado (0.17 ± 0.03%) (**Figura 5B; Tabla 11**). De los sitios Restaurados, ER-7, ER-6 y ER-5 son similares al sitio Perturbado, mientras que solo ER-3 presenta semejanza con el sitio Conservado y el sitio Perturbado (**Figura 5B; Tabla 11**).

La relación C:N fue similar entre todos los sitios analizados, excepto en ER-3, que solo es similar al sitio Conservado (**Figura 5C; Tabla 11**).

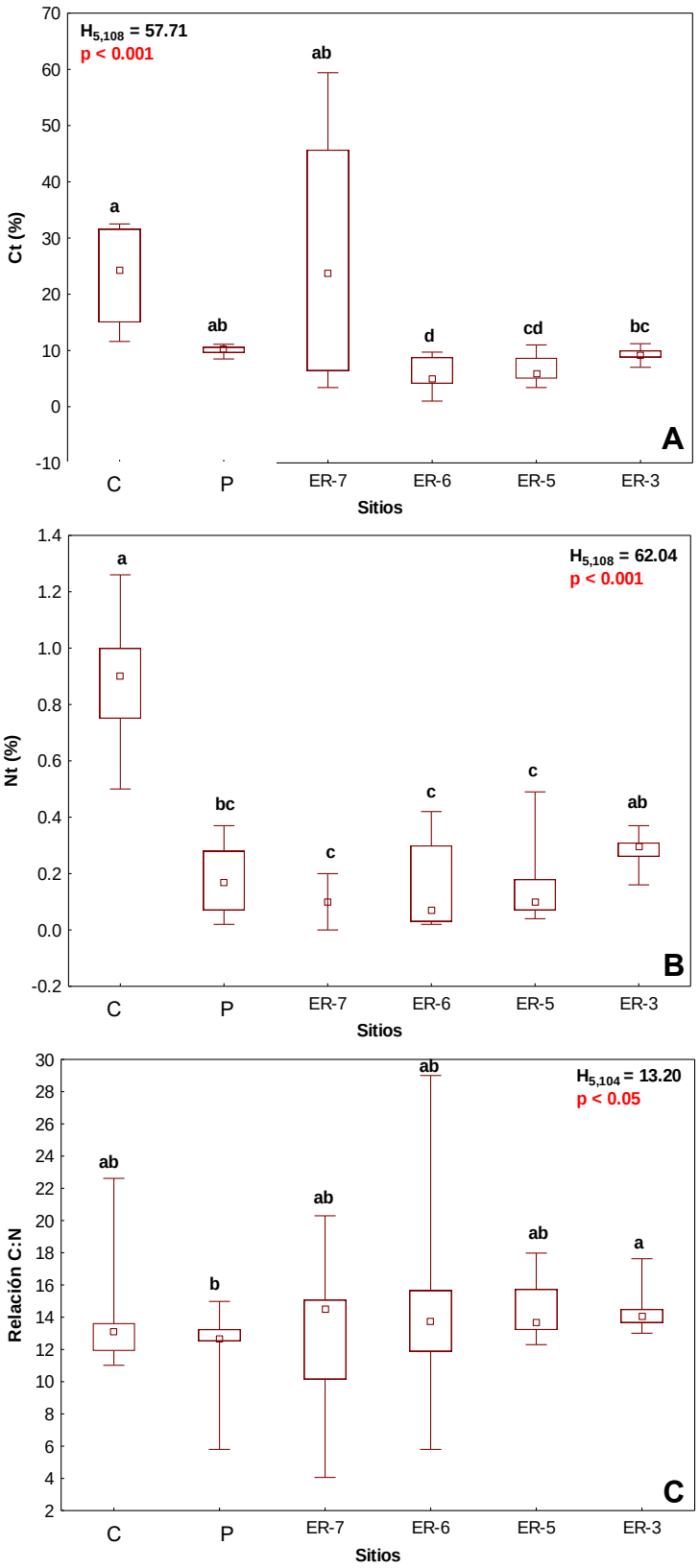


Figura 5. Propiedades químicas del suelo: Carbono Orgánico Total (Ct; A), Nitrógeno Total (Nt; B) y relación C:N (C) en los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3) (N = 18). Se muestran la

media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05).

Tabla 11. Propiedades químicas del suelo: Carbono Orgánico Total (Ct), Nitrógeno Total (Nt) y relación C:N en los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos (p < 0.05).

Sitios	Ct (%)	Nt (%)	C:N
Conservado	23.4 **a** ± 2.01	0.87 **a** ± 0.05	13.6 **ab** ±0.66
Perturbado	10.1 **ab** ± 0.17	0.17 **bc** ± 0.03	12.2 **b** ± 0.51
ER-7	26.7 **ab** ± 5.11	0.11 **c** ± 0.02	12.1 **ab** ± 1.20
ER-6	5.6 **d** ± 0.66	0.15 **c** ± 0.03	14.4 **ab** ± 1.31
ER-5	6.6 **cd** ± 0.52	0.14 **c** ± 0.03	14.3 **ab** ± 0.42
ER-3	9.3 **bc** ± 0.24	0.28 **ab** ± 0.01	14.2 **a** ± 0.25

Los valores promedio de concentración de nitrato (NO_3^-) son similares entre el sitio Conservado (117.33 ± 26.09 µg/g) y el sitio Perturbado (32.11 ± 3.11 µg/g) sin embargo, para el sitio Conservado se aprecia la mayor variación con respecto al resto de los sitios (**Figura 6A; Tabla 12**). De los sitios Restaurados, ER-7 mostró los valores más bajos, incluso menores que el sitio Perturbado, mientras que ER-5 presentó valores similares tanto al sitio Conservado como al sitio Perturbado. ER-6 y ER-3 solo mostraron valores similares al sitio Conservado (**Figura 6A; Tabla 12**).

En promedio, la concentración de amonio (NH_4^+) fue mayor en el sitio Conservado (44.33 ± 7.82 µg/g) que en el sitio Perturbado (18.06 ± 0.69 µg/g) (**Figura 6B; Tabla 12**). De los sitios Restaurados, ER-6 y ER-3 son similares en valor al sitio Conservado, mientras que ER-7 y ER-5 presentaron valores inferiores a los encontrados en el sitio Perturbado (**Figura 6B; Tabla 12**).

La relación NO_3^-:NH_4^+ fue similar entre el sitio Conservado (2.54 ± 0.64) y el Perturbado (1.76 ± 0.14) y todos los sitios restaurados son similares a los de referencia (**Figura 6C; Tabla 12**).

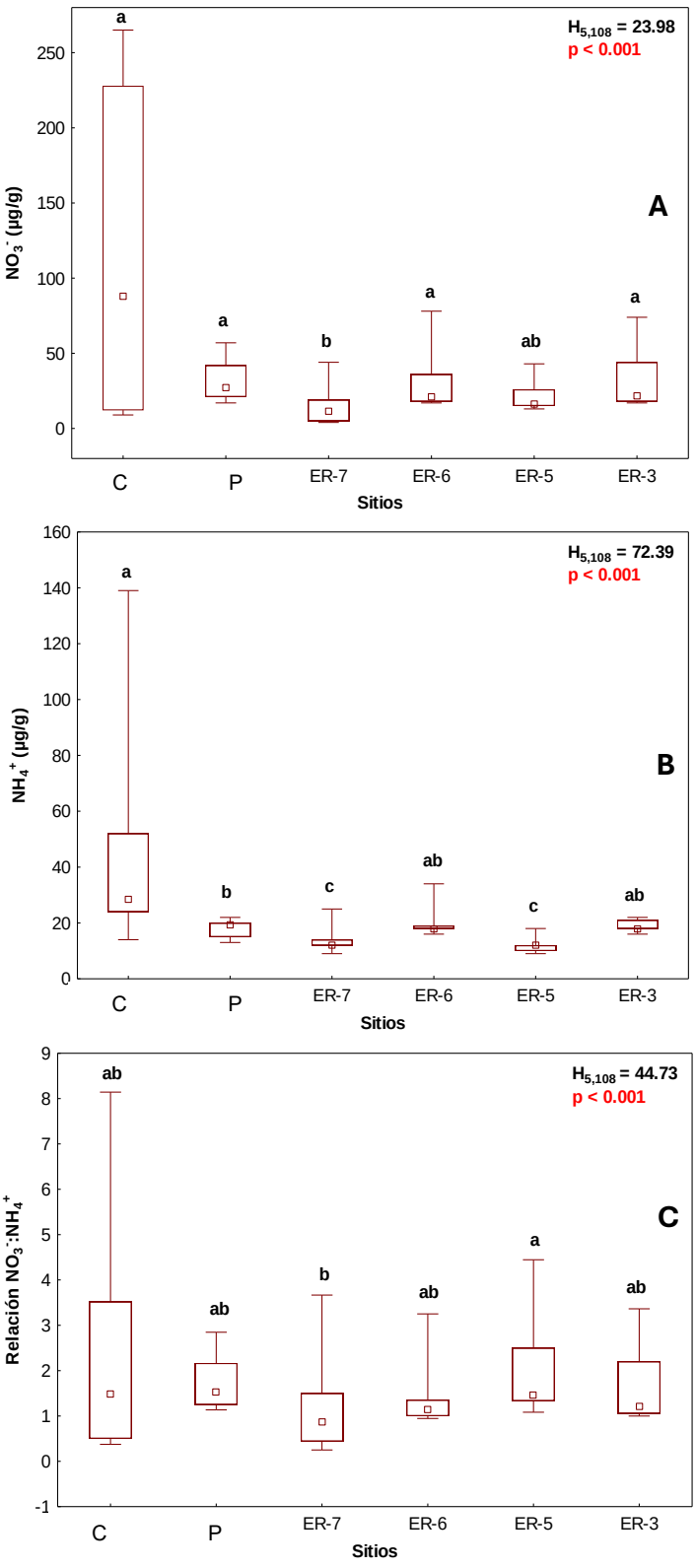


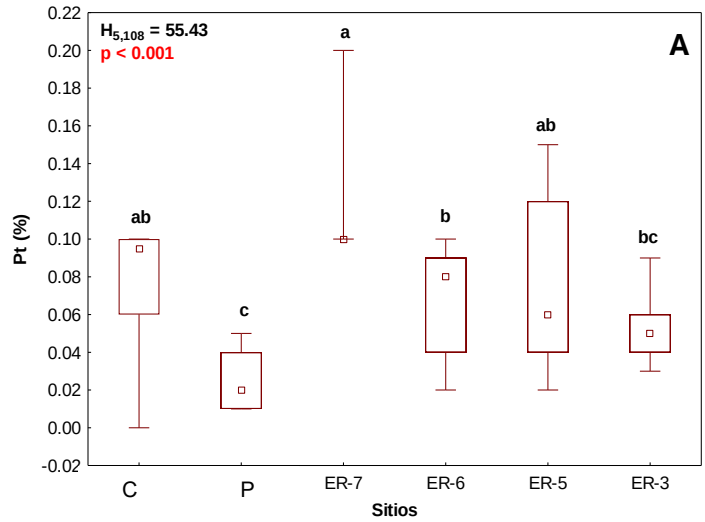
Figura 6.Propiedades químicas del suelo: concentración de nitrato (NO_3^-; A), amonio (NH_4^+; B) y relación C:N (C) en los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05).

Tabla 12. Propiedades químicas del suelo: Nitrógeno Inorgánico (NO_3^- y NH_4^+) y relación NO_3^-: NH_4^+ en los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05).

Sitios	NO_3^- (µg/g)	NH_4^+ (µg/g)	NO_3^- : NH_4^+
Conservado	117.3 **a** ± 26.09	44.3 **a** ± 7.82	2.54 **ab** ± 0.64
Perturbado	32.1 **a** ± 3.11	18.1 **b** ± 0.69	1.76 **ab** ± 0.14
ER-7	14.6 **b** ± 2.60	13.4 **c** ± 0.81	1.17 **b** ± 0.23
ER-6	28.5 **a** ± 4.01	19.5 **ab** ± 0.95	1.44 **ab** ± 0.17
ER-5	21.9 **ab** ± 2.43	11.6 **c** ± 0.58	1.94 **a** ± 0.24
ER-3	32.3 **a** ± 4.42	19.0 **ab** ± 0.46	1.64 **ab** ± 0.19

En promedio, los valores de concentración de fósforo total (Pt) en el suelo fueron mayores en el sitio Conservado (0.08 ± 0.01%) que en el sitio Perturbado (0.03 ± 0.00%) (**Figura 7A; Tabla 13**). De los sitios Restaurados, ER-7, ER-6 y ER-5 presentaron valores similares a los del sitio Conservado mientras que ER-3 presentó valores similares a los del sitio Perturbado (**Figura 7A; Tabla 13**).

En promedio, los valores de concentración de fósforo disponible (Pa) en el suelo fueron mayores en el sitio Conservado (23.33 ± 2.32 µg/g) que en el sitio Perturbado (10.56 ± 1.36 µg/g) (**Figura 7B; Tabla 13**). De los sitios Restaurados, ER-7, ER-6 y ER-5 presentaron valores similares al sitio Perturbado y ER-3 presentó valores similares al sitio Conservado y al Perturbado (**Figura 7B; Tabla 13**).



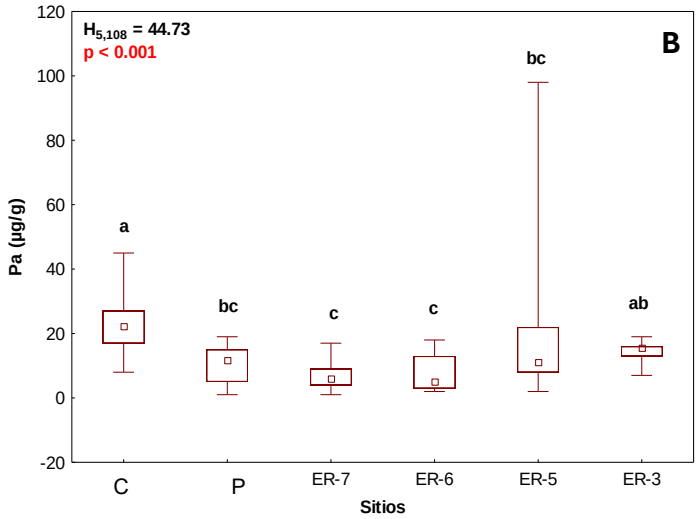


Figura 7. Propiedades químicas del suelo: concentración de fósforo total (Pt; A) y fósforo disponible (Pa; B) en los sitios Conservado (C), Perturbado (P) y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05).

Tabla 13. Propiedades químicas del suelo: Fósforo Total (Pt) y Fósforo Disponible (Pa) en los sitios Conservado, Perturbado y los sitios Restaurados (ER-7, ER-6, ER-5, y ER-3) (N = 18). Se muestran la media y el error estándar junto con los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis. Letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios (p < 0.05).

Sitios	Pt (%)	Pa (µg/g)
Conservado	0.079 **ab** ± 0.028	23.33 **a** ± 2.32
Perturbado	0.026 **c** ± 0.014	10.56 **bc** ± 1.36
ER-7	0.106 **a** ± 0.024	6.83 **c** ± 0.97
ER-6	0.066 **b** ± 0.029	7.89 **c** ± 1.24
ER-5	0.077 **ab** ± 0.043	20.17 **bc** ± 5.74
ER-3	0.051 **bc** ± 0.016	14.78 **ab** ± 0.63

Relación Planta-Suelo

Propiedades del suelo

Se evaluaron trece propiedades del suelo en los primeros 10 cm de profundidad en los sitios Restaurados durante las estaciones seca y de lluvia. El análisis de componentes principales (ACP) permitió identificar los factores más relevantes en la variabilidad del suelo.

En la estación seca, los dos primeros ejes del ACP explicaron el 70.40% (**Figura 8A**) de la varianza en las variables físicas y el 61.48% (**Figura 8B**) en las variables químicas.

Factor 1: estuvo relacionado positivamente con la profundidad del suelo y negativamente con la densidad aparente en las variables físicas (**Figura 8A**), mientras que en las variables químicas se relacionó positivamente con el Nt y negativamente con el pH (**Figura 8B**).

Factor 2: se relacionó positivamente con el CGA y negativamente con la profundidad en las variables físicas (**Figura 8A**), y se relacionó positivamente con el Pt y negativamente con el Ct en las variables químicas (**Figura 8B**).

En la estación lluviosa, los dos primeros ejes explicaron un mayor porcentaje de varianza: 91.09% (**Figura 8C**) en las variables físicas y 70.99% (**Figura 8D**) en las variables químicas.

Factor 1: de las variables físicas estuvo relacionado positivamente con el CGA y negativamente con la pedregosidad (**Figura 8C**), mientras que, en las variables químicas, se relacionó positivamente con el pH y negativamente con el Nt (**Figura 8D**).

Factor 2: en las variables físicas se relacionó positivamente con la profundidad del suelo y negativamente con el CGA (**Figura 8C**), mientras que en las químicas estuvo relacionado positivamente por el Pa y negativamente por la capacidad de intercambio catiónico (CEC; **Figura 8D**).

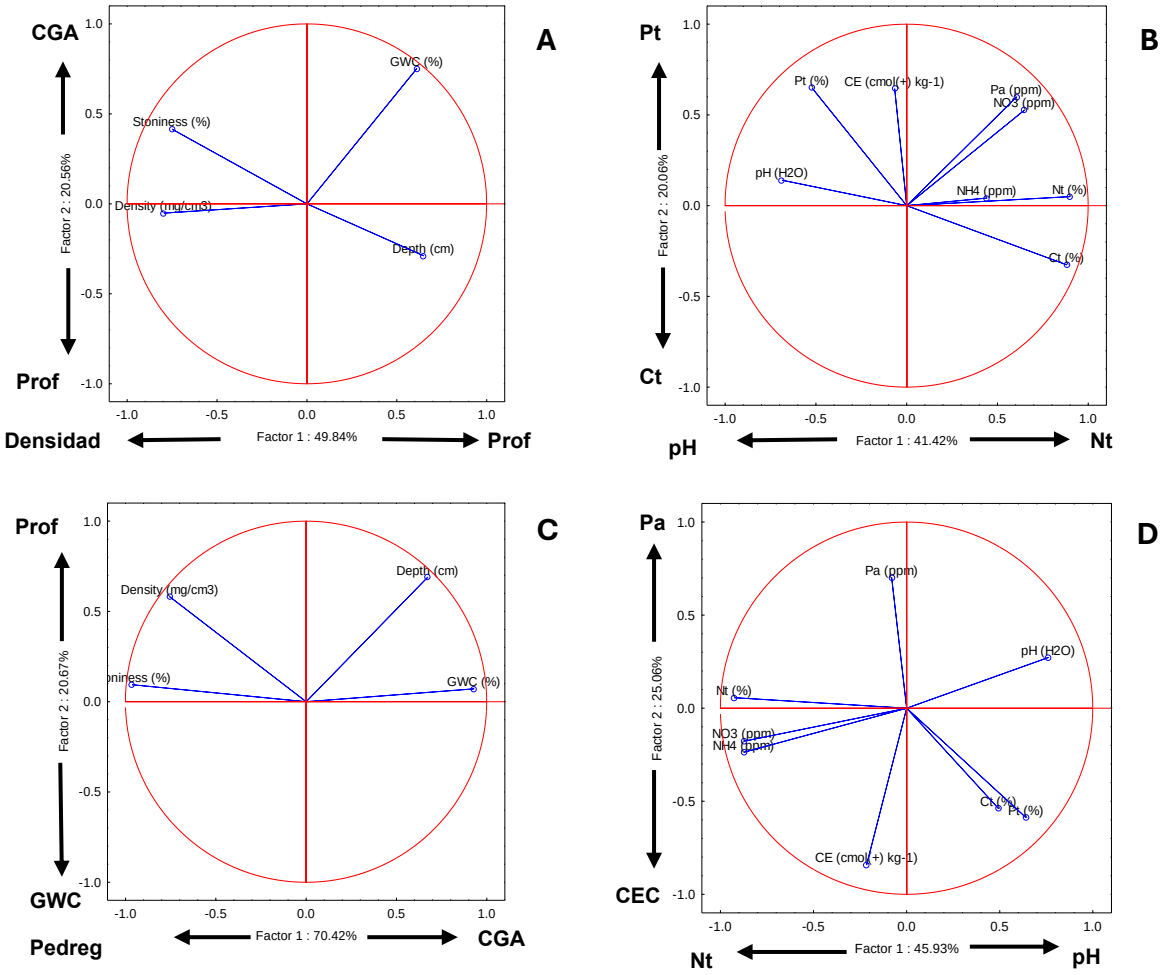
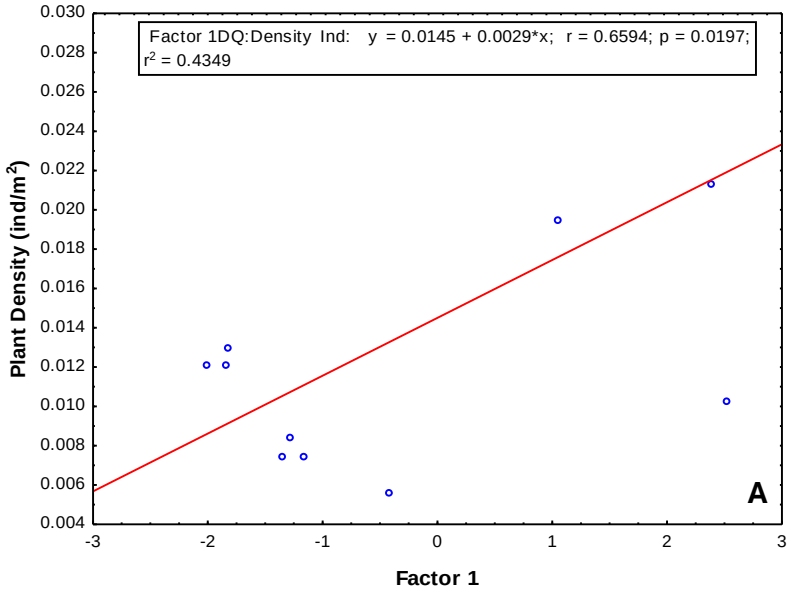
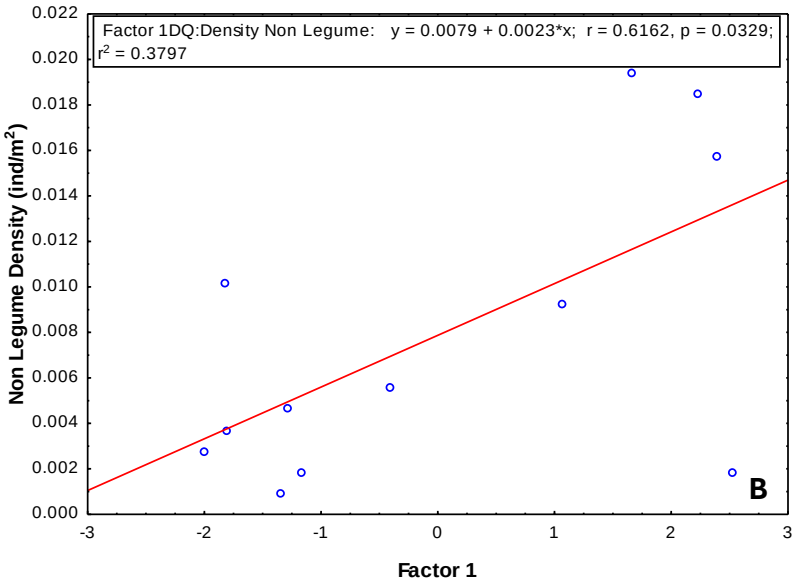


Figura 8. ACP de las variables físicas (A y C) y químicas (B y D) del suelo de los sitios Restaurados durante la estación seca (A y B) y de lluvia (C y D). Se muestran los Factores 1 y 2 así como la contribución a la varianza de cada uno.

Correlaciones entre suelo y vegetación y variabilidad estacional

El análisis de correlaciones mostró que el Nt y el pH están relacionados con la estructura, composición y sobrevivencia y muestran el mismo patrón en ambas estaciones. Tanto en seca como seis meses después, en lluvia, la densidad de no leguminosas aumentó en suelos con mayor Nt y menor pH, mientras que la sobrevivencia de plantas leñosas después de un año disminuyó en estas mismas condiciones (**Figuras 8B y 8D, 9A-C y 10A-B**).





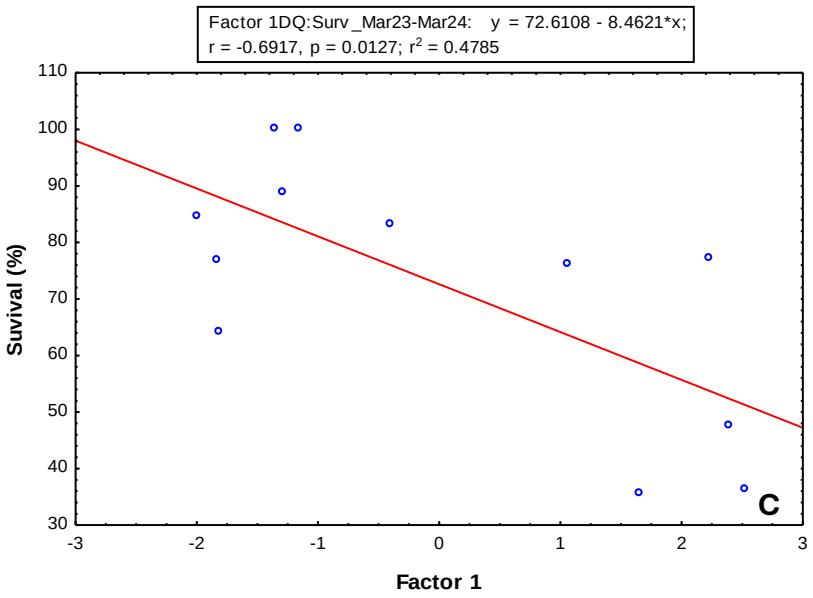
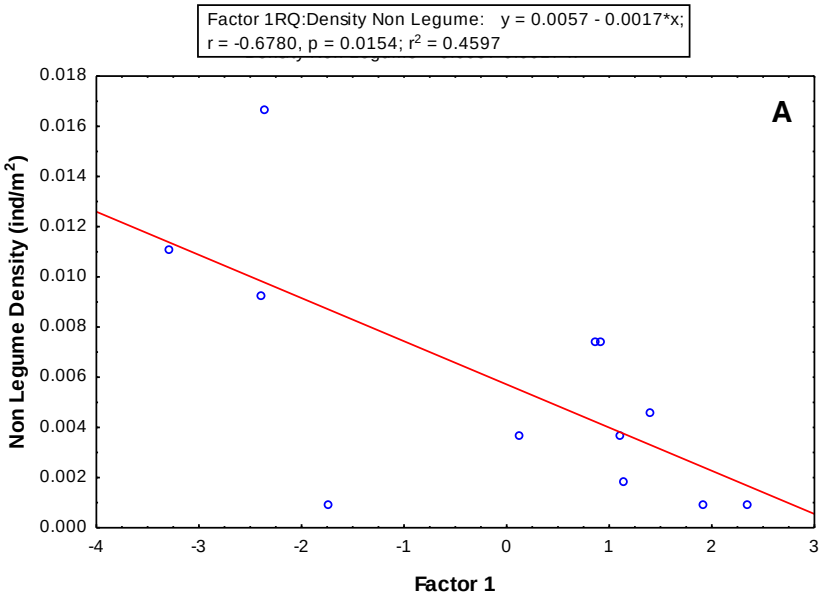


Figura 9. Regresión lineal de la densidad de plantas (Plant Density; A) y densidad de no leguminosas (Non Legume Density; B) en estación seca y la sobrevivencia (Survival; marzo 2023 - marzo 2024; C) en función de los puntajes del ACP para el Factor 1 en la estación seca de propiedades químicas del suelo. Se muestran los valores de r², la línea de regresión y la ecuación.



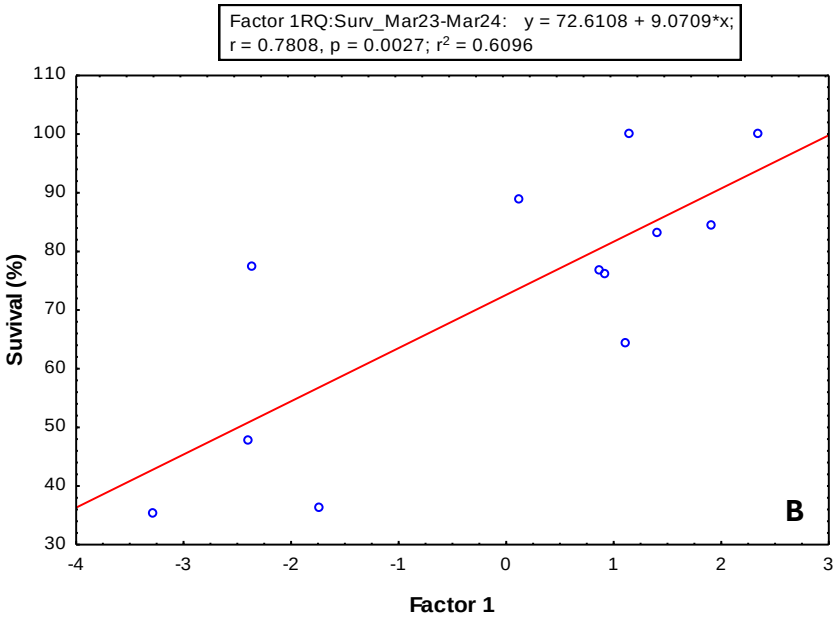


Figura 10. Regresión lineal de la densidad de no leguminosas (Non Legume Density; A) y de la sobrevivencia (Survival; marzo 2023 - marzo 2024; B) en la estación de lluvia en función de los puntajes del ACP para el Factor 1 de las propiedades químicas del suelo en la estación de lluvia. Se muestran los valores de r², la línea de regresión y la ecuación.

El Pt y el Ct también jugaron un papel relevante en estación seca, donde la densidad de especies aumentó con mayor Pt y menor Ct (**Figuras 8B y 11**). Estas diferencias también fueron apreciables un año después (**Figuras 8B y 12**). Sin embargo, otras variables de estructura, composición y desempeño no mostraron correlaciones significativas con los factores del ACP (**ver anexo 2**).

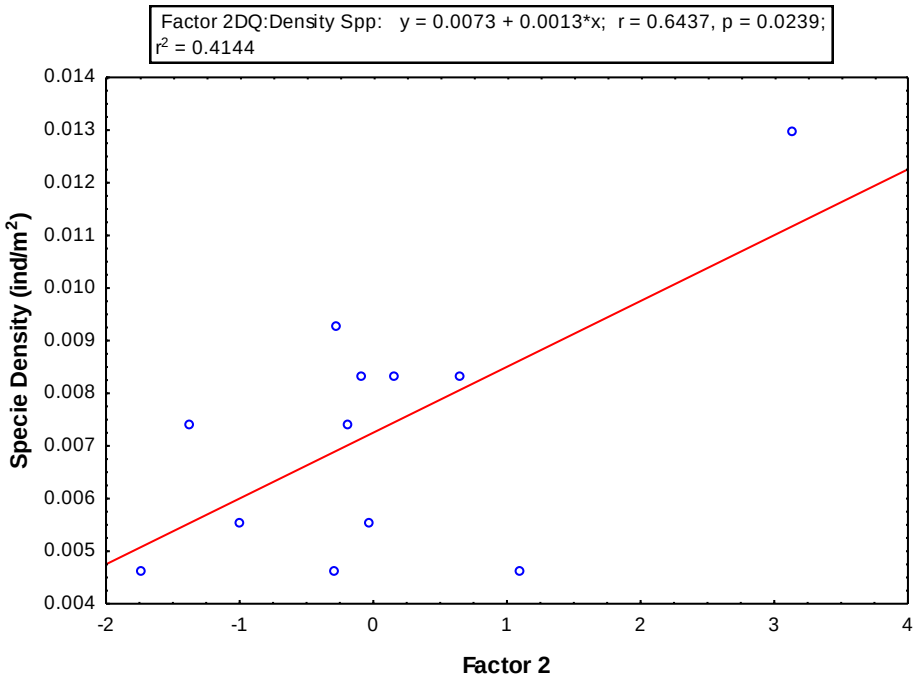


Figura 11. Regresión lineal de la densidad de especies (Specie Density) en la estación seca en función de los puntajes del ACP para el Factor 2 en la estación seca de propiedades químicas del suelo. Se muestran los valores de r², la línea de regresión y la ecuación.

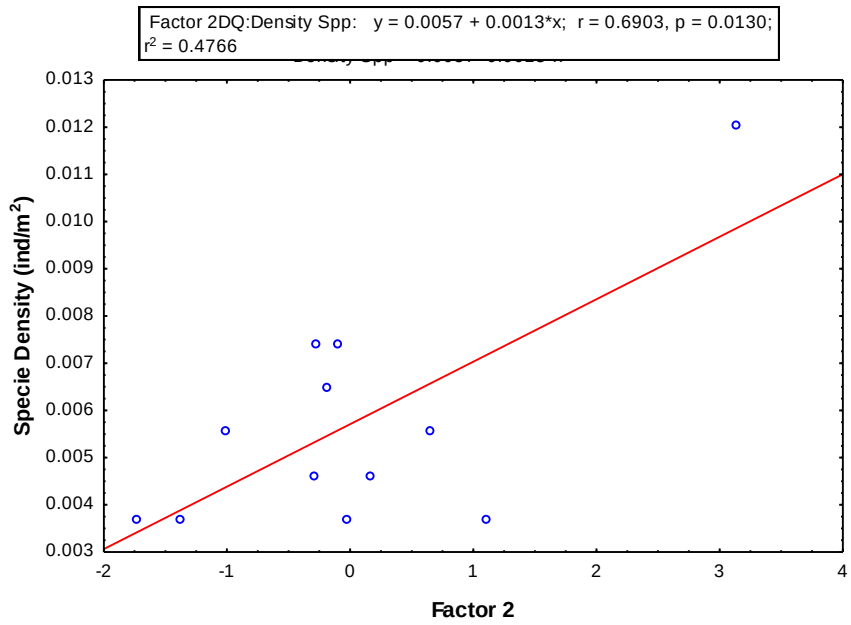


Figura 12.Regresión lineal de la densidad de especies (Specie Density) en estación de lluvia en función de los puntajes del ACP para el Factor 2 de las propiedades químicas del suelo en la estación seca. Se muestran los valores de r², la línea de regresión y la ecuación.

Discusión

El presente estudio sobre plantas leñosas permitió evaluar el estado actual de los sitios Restaurados en comparación con un sitio Conservado, proporcionando información clave para mejorar las estrategias de restauración ecológica implementadas por la empresa. Los resultados no solo revelaron diferencias en la composición y estructura de la vegetación entre ambos tipos de sitios, sino que también identificaron las especies con mayor sobrevivencia, las cuales deberían priorizarse en futuras intervenciones. Además, el análisis de los grupos funcionales y estados sucesionales permitió comprender mejor los patrones de establecimiento y desempeño de las especies en los sitios Restaurados, ofreciendo una base científica para optimizar las prácticas de restauración en este ecosistema minero.

Estado sucesional de los sitios Restaurados

Los sitios Restaurados aún presentan diferencias en estructura y composición con respecto al sitio Conservado, probablemente debido a su estado sucesional temprano y a la estrategia de restauración utilizada. La empresa responsable establece las plantas de manera aleatoria según su disponibilidad en el vivero, sin considerar su edad, especie o una distribución específica en términos de densidad. Estas decisiones pueden afectar la trayectoria sucesional, ya que la composición inicial de especies influye directamente en la dinámica de recuperación del ecosistema **(Holl y Aide, 2011)**.

Sin embargo, es importante destacar que el tamaño de muestra entre los sitios comparados no es equitativo (N = 6 en el Conservado vs. N = 24 en los Restaurados), lo que puede influir en la interpretación de los resultados. Aunque se encontraron diferencias significativas en la estructura y composición de la vegetación, estas deben tomarse con cautela, ya que un desbalance en el número de muestras puede aumentar la probabilidad de detectar diferencias significativas. Esta limitación metodológica debe considerarse al planificar futuros estudios que evalúen el avance de la restauración ecológica en esta área. Así, además de las diferencias metodológicas mencionadas anteriormente, factores ecológicos propios de la sucesión y la dinámica del ecosistema también pueden estar influyendo en las diferencias observadas.

En los primeros años de sucesión natural, la revegetación en terrenos altamente degradados, como los mineros, es un proceso lento y condicionado por múltiples factores. Se ha documentado que, en ecosistemas perturbados, la restauración de la vegetación puede tardar varias décadas si no se implementan estrategias enfocadas en las limitaciones del sitio **(Chazdon, 2014)**. En este estudio, el sitio Restaurado más antiguo tiene siete años (ER-7), un período que aún podría ser insuficiente para alcanzar una cobertura vegetal similar a la del sitio Conservado. Esto se debe a que la recuperación ecológica no solo implica el establecimiento de plantas, sino también la sobrevivencia a lo largo del tiempo y el conocimiento de su historia de vida, ya que algunas especies no logran resistir los cambios estacionales o las condiciones

adversas del suelo **(Zimmerman et al., 2000)**. Además, factores como la disponibilidad de agua, la competencia interespecífica y las condiciones edáficas pueden ralentizar significativamente la regeneración **(Lamb et al., 2005)**.

Desde la teoría de la sucesión ecológica, este proceso es predecible y puede ser influenciado por la selección de especies utilizadas en la restauración **(Connell y Slatyer, 1977)**. En este sentido, priorizar especies con características resilientes, como las leguminosas y pioneras, podría acelerar la recuperación, ya que estas plantas tienen la capacidad de rebrotar tras daños y mejorar la fertilidad del suelo mediante la fijación de nitrógeno **(Zitzer et al., 1996; Fredericksen et al., 2000; Batterman et al., 2013)** y su gran aporte de hojarasca **(Barchuk et al., 2006)**. No obstante, los resultados de este estudio han revelado que ciertas especies no leguminosas también presentan altas tasas de sobrevivencia y un buen desempeño en este sitio, por lo que sería recomendable considerarlas también dentro de las estrategias de restauración.

Nuestros hallazgos coinciden con estudios previos que indican que los ecosistemas afectados por disturbios severos, como la minería, pueden tardar entre nueve y trece años en recuperar características clave de su estructura y composición **(Parrotta y Knowles, 1999)**. Adicionalmente, se ha encontrado que la velocidad de recuperación depende de la disponibilidad de suelo fértil, la interacción con especies pioneras y la presencia de fauna que facilite la dispersión de semillas **(Corlett, 2016)**. Investigaciones como las de **Holl y Aide (2011)** y **Chazdon (2014)** han demostrado que los procesos sucesionales pueden acelerarse mediante estrategias activas de restauración, tales como la siembra dirigida de especies clave y la introducción de organismos que favorezcan la regeneración natural.

Composición de especies y desempeño

Pithecellobium dulce, *Croton ciliatoglandulifer*, *Ipomoea arborescens*, *Dalea leptostachya* y *Dodonaea viscosa* mostraron signos de buena recuperación en estas áreas mineras debido a su alta sobrevivencia después de seis meses. Estas especies se caracterizan por su resistencia a condiciones adversas.

Por ejemplo, *Pithecellobium dulce* es una leguminosa ruderal capaz de crecer tanto a pleno sol como en sombra, con alta resistencia a la sequía **(CATIE, 1999; Vargas-Figueroa et al., 2014)**. Puede prosperar en suelos someros, pobres en nutrientes y con alta presencia de rocas calcáreas **(Von Carlowitz et al., 1991)**, lo que la convierte en una especie ampliamente utilizada en programas de restauración. Además, es considerada de alto desempeño en SBC y contribuye a la mejora del suelo **(Cervantes et al., 1998; Vargas-Figueroa et al., 2014)**.

Por otro lado, *Croton ciliatoglandulifer* ha sido reportada como una especie de alta sobrevivencia, adaptándose a diversos ecosistemas como SBC, matorral xerófilo y bosque de encino **(Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana, 2009; Contreras-Rodríguez, 2022)**. Además, tiene la capacidad de establecer relaciones

micorrícicas, al igual que las leguminosas, lo que le confiere una ventaja adicional en suelos pobres en nutrientes **(Vargas-Vázquez et al., 2021)**.

Las especies del género *Ipomoea* son típicas de ambientes secos. Según la base de datos **iNaturalistMX**, *Ipomoea arborescens* crece de manera silvestre en selvas secas y bosques templados de varios estados de México. Es altamente resistente a la sequía y prospera en laderas y sitios perturbados, siendo uno de los pocos árboles que pueden sobrevivir en áreas deforestadas. Se ha reportado que *I. arborescens* es característica de sucesiones ecológicas más avanzadas, aunque también es abundante en sitios perturbados **(Contreras-Rodríguez, 2022)**. Mientras tanto, *I. pauciflora* es propia de SBC, matorrales secos y colinas **(iNaturalistMX)**.

Dalea leptostachya es una especie registrada en abundancia en SBC **(Contreras-Rodríguez, 2022; Plants of the World Online)**. Al ser una leguminosa, tiene la capacidad de formar asociaciones micorrícicas, lo que le otorga una ventaja en áreas mineras degradadas **(Márquez-Torres, 2016)**.

Finalmente, *Dodonaea viscosa* es una especie pionera no leguminosa con alta sobrevivencia en SBC, debido a su tolerancia a la sequía y su presencia frecuente en sitios ruderales **(Vázquez-Yanes et al., 1999)**, lo que le permite colonizar con éxito suelos degradados.

Por otra parte, el análisis de crecimiento según el grupo funcional mostró un mayor incremento en el crecimiento de las leguminosas en comparación con las no leguminosas luego de seis meses, un resultado esperado debido a su capacidad de fijación de nitrógeno y adaptación a suelos degradados **(Zitzer et al., 1996; Fredericksen et al., 2000; Fornara y Tilman, 2008; Batterman et al., 2013)**. Diversos estudios han demostrado que las leguminosas desempeñan un papel clave en la recuperación de ecosistemas perturbados al mejorar la fertilidad del suelo y facilitar el establecimiento de otras especies **(Lohbeck et al., 2013; Márquez-Torres, 2022)**. Además, germinan rápidamente y crecen con mayor velocidad que otras especies inmediatamente después de la germinación, lo que les permite maximizar su desempeño cuando la luz y los recursos están disponibles, especialmente al inicio de la temporada de lluvias **(Smith-Martin et al., 2017)**. Esta ventaja inicial ha sido observada en otros estudios, donde las leguminosas presentan una mayor eficiencia en el uso del agua y un alto contenido de nitrógeno y carbono en las hojas, lo que las hace más competitivas en condiciones de limitación de recursos **(Adams et al., 2010; Powers y Tiffin, 2010; Sui et al., 2011; Adams et al., 2016)**.

Sin embargo, en términos de sobrevivencia, no se encontraron diferencias significativas entre ambos grupos funcionales. Esto concuerda con estudios previos que sugieren que la persistencia de las plántulas en ambientes degradados depende de múltiples factores más allá de la fijación de nitrógeno, como la tolerancia a la sequía, la competencia por recursos y la variabilidad interespecífica dentro de cada grupo funcional **(Reid et al., 2018)**. Investigaciones han demostrado que la tasa de sobrevivencia en las primeras etapas sucesionales puede verse influida más por las

condiciones ambientales que por la clasificación funcional de las especies **(Ceccon et al., 2006; Gei et al., 2018)**. Además, si bien las leguminosas suelen presentar mayor biomasa en ambientes con recursos limitados, bajo condiciones de alta disponibilidad de nutrientes las no leguminosas pueden superarlas en términos de crecimiento **(Sui et al., 2011)**.

En cuanto a la clasificación sucesional, contrario a lo esperado, las especies no pioneras presentaron una mayor sobrevivencia que las pioneras y no existieron diferencias en cuanto al crecimiento entre ambos grupos. Según la teoría de la sucesión ecológica, se esperaría que las especies pioneras dominaran en las etapas tempranas del proceso debido a su rápido crecimiento y alta tolerancia a condiciones extremas **(Connell y Slatyer, 1977)**. Sin embargo, estudios recientes han documentado que, en escenarios de restauración, las especies no pioneras pueden establecerse con éxito desde el inicio, especialmente cuando las condiciones del sitio no son tan adversas como en una sucesión primaria estricta **(Muscarella et al., 2017)**.

La menor mortalidad de las especies no pioneras en los sitios Restaurados sugiere que estos no están enfrentando condiciones extremadamente limitantes, como se asumía inicialmente. Esto indica que la labor de restauración está logrando restablecer características clave del ecosistema, permitiendo la colonización de especies típicamente asociadas a etapas más avanzadas de la sucesión. En las SBC del Neotrópico, las condiciones microclimáticas en las primeras etapas sucesionales suelen ser más estresantes que en los bosques húmedos, lo que puede afectar la dinámica de establecimiento de las especies pioneras **(Ceccon et al., 2006; Lebrija-Trejos et al., 2008)**. Sin embargo, investigaciones han señalado que, en ciertas condiciones, las especies no pioneras pueden presentar mayor sobrevivencia al no depender de un crecimiento acelerado que implique un alto gasto de recursos **(Gei et al., 2018)**.

Además, aunque las especies pioneras cumplen un papel fundamental en la sucesión al generar ambientes más favorables para otras especies **(Badano et al., 2009; Chapin et al., 2011; Williams-Linera et al., 2011)**, su alta demanda de luz y rápida inversión en biomasa pueden hacerlas más vulnerables a cambios en la disponibilidad de recursos, afectando su establecimiento en ciertas condiciones de restauración. En este contexto, se ha reportado que las diferencias en tasas de crecimiento entre especies pioneras y no pioneras pueden ser poco marcadas en proyectos de restauración activa, ya que la disponibilidad de recursos puede modificar las estrategias de crecimiento observadas en sucesiones naturales **(Poorter et al., 2016)**.

A pesar de todo esto, es importante considerar que las no diferencias encontradas entre especies pioneras y no pioneras en cuanto al crecimiento tanto en altura como en diámetro basal puede ser debida a la disparidad de N entre ambos grupos, con lo cual sería necesario considerar esta limitación metodológica al planificar futuros estudios que evalúen el avance de la restauración ecológica en esta área.

Estos resultados refuerzan la importancia de evaluar las condiciones específicas de los sitios Restaurados y los factores que influyen en el establecimiento de las especies más allá de su clasificación funcional. La mayor sobrevivencia de las especies no pioneras sugiere que los esfuerzos de restauración están promoviendo condiciones favorables que permiten la coexistencia de especies de diferentes etapas sucesionales, lo que podría acelerar la recuperación del ecosistema.

Implicaciones para estrategias de restauración

Dado que *Pithecellobium dulce*, *Croton ciliatoglandulifer*, *Ipomoea arborescens*, *Dalea leptostachya* y *Dodonaea viscosa* han mostrado altas tasas de sobrevivencia en este estudio, recomendamos priorizarlas en futuros proyectos de restauración ecológica en el ecosistema de SBC minero. Asimismo, el grupo de las leguminosas, en general, desempeña un papel clave en la recuperación del sitio, ya que su capacidad de fijación de nitrógeno y la producción de hojarasca contribuyen a la mejora de la fertilidad del suelo **(Adams et al., 2010; Powers y Tiffin, 2010; Sui et al., 2011; Adams et al., 2016 y Smith-Martin et al., 2017)**. Por ello, su incorporación debe considerarse esencial en las estrategias de restauración de esta cantera.

Actualmente, existe poca claridad sobre las estrategias específicas implementadas por la empresa en el proceso de restauración, así como una limitada información detallada sobre la evolución de los sitios. Aunque se llevan registros de salida de especies del vivero, estos no permiten realizar análisis estadísticos sobre el desempeño de las plantaciones. Para mejorar el monitoreo y la efectividad de las acciones de restauración, sería recomendable que la empresa implementara un sistema de control anual que documente no solo las especies plantadas, sino también su desarrollo en el tiempo. Este registro podría incluir datos sobre nuevas plantaciones, la aplicación de técnicas como la lluvia de semillas o la reestructuración de áreas específicas dentro de la cantera, de manera que sea posible realizar análisis cuantitativos que respalden la toma de decisiones.

Llevar un seguimiento detallado permitirá conocer la densidad exacta de especies en cada sitio, así como su evolución a lo largo del tiempo. Con base en estos datos, se podrán realizar ajustes en las estrategias de plantación, priorizando aquellas especies que han mostrado un mejor desempeño en las condiciones particulares de la cantera.

Además, es necesario aumentar la densidad de plantas establecidas, ya sea mediante plantación directa o siembra, ya que, hasta el momento, los sitios Restaurados aún no alcanzan la estructura y composición vegetal observadas en el sitio Conservado.

Limitaciones y futuras investigaciones

Este estudio evaluó la estructura, composición y desempeño de plantas leñosas después de seis meses de lluvias, proporcionando información valiosa sobre la respuesta inicial de la vegetación en los sitios Restaurados en la cantera. Sin

embargo, presenta algunas limitaciones que deben considerarse para futuras investigaciones.

1. Monitoreo a largo plazo: Es crucial dar seguimiento a la dinámica de las especies establecidas para evaluar su capacidad de persistencia y adaptación a lo largo del tiempo. Esto ayudaría a determinar si las estrategias de restauración actuales son efectivas o si requieren ajustes.

2. Optimización del diseño de muestreo: Se recomienda aumentar la cantidad de parcelas en el sitio Conservado y disminuir su tamaño en ambos tipos de sitios (Conservado y Restaurados) para obtener un mayor número de réplicas y mejorar la precisión de los análisis estadísticos.

3. Enfoque en especies con alta sobrevivencia: En lugar de analizar todas las especies en general, futuras investigaciones en esta cantera de extracción minera deberían centrarse en las cinco especies con las tasas de sobrevivencia más altas en este estudio (*Pithecellobium dulce*, *Croton ciliatoglandulifer*, *Ipomoea arborescens*, *Dalea leptostachya* y *Dodonaea viscosa*) en principio. Esto permitiría obtener datos más específicos y reducir la variabilidad en los resultados.

4. Evaluación de la regeneración natural: Incorporar el estudio de especies reclutadas después del período de seis meses permitiría conocer en qué fase de la sucesión natural se encuentran los sitios Restaurados. Esto ofrecería información clave sobre la capacidad de regeneración espontánea del ecosistema y la necesidad de intervenciones adicionales.

5. Identificación y registro de las especies plantadas: a empresa lleve un registro más detallado sobre las especies plantadas, incluyendo su edad y una identificación precisa. Esto facilitaría la distinción entre individuos reclutados de forma natural y aquellos introducidos durante las acciones de restauración, lo cual contribuiría a una evaluación más precisa del desempeño de las especies plantadas.

Estas propuestas contribuirían a mejorar la efectividad de los proyectos de restauración en el ecosistema minero de SBC y a generar estrategias más precisas y basadas en evidencia para la recuperación de estos ecosistemas.

Propiedades del suelo

El estudio del suelo de la cantera se realizó en dos partes y se midieron diferentes propiedades (profundidad, pedregosidad, contenido gravimétrico de agua y densidad aparente, pH, concentración de carbono total, concentración de nitrógeno total, relación C:N, concentración de nitrato, concentración de amonio, relación NO_3^-:NH_4^+, concentración de fósforo total y concentración de fósforo disponible) que permitieron evaluar la fertilidad del suelo. Una de las partes contempla el análisis entre estaciones seca y de lluvia en los sitios Restaurados. La otra parte del estudio de suelos contempla el análisis de estas variables entre cada uno de los sitios estudiados

(Conservado y Perturbado como referencias y los cuatro sitios Restaurados por independiente: ER-7, ER-6, ER-5 y ER-3).

Variación estacional de las propiedades del suelo

En este estudio, se evaluaron diferentes propiedades del suelo en dos momentos clave: durante la época seca y seis meses después, en la época de lluvias. Durante la estación seca, los nutrientes tienden a acumularse debido a la falta de absorción por parte de las plantas y a la reducida actividad de descomposición microbiana **(Jaramillo y Sanford, 1995 y Carrasco-Carballido, 2019)**. Solo cuatro de las 12 propiedades mostraron cambios significativos entre ambas estaciones (**Tabla 8**).

Contenido Gravimétrico de Agua (*CGA*)

Como era de esperar, el contenido gravimétrico de agua del suelo aumentó significativamente después de seis meses de lluvias (**Tabla 8**) en los sitios Restaurados, lo que es un resultado coherente con la mayor precipitación (**Figura 1**) y disponibilidad de agua en el suelo durante este periodo. Esto refleja una captación y retención de agua superior durante las precipitaciones, lo cual es fundamental para el establecimiento de plantas y la actividad biológica en el suelo. Esta capacidad de retención indica un proceso de recuperación en los suelos restaurados, pero es crucial monitorear si esta tendencia se mantiene en el tiempo o si, en época seca, el suelo pierde agua rápidamente debido a la estructura de sus poros.

Densidad Aparente

Según lo esperado, la densidad aparente del suelo disminuyó después de seis meses de lluvias (**Tabla 8**). Esto se debe a que, en la temporada de lluvias, el agua adicional ocupa los espacios intersticiales entre las partículas **(Hillel, 2003; Taiz y Zeiger, 2010)**, aumentando el volumen total del suelo y, al secarse la muestra, se refleja en una menor densidad aparente. Por tanto, la densidad aparente es un parámetro que varía con la estacionalidad.

pH

Contrario a lo esperado no hubo cambios significativos en el pH luego de seis meses de lluvias (**Tabla 8**). **Barajas-Guzmán et al. (2006)** y **Jiménez-Hernández (2021)** encontraron un pH más ácido en secas, mientras que **Carrasco-Carballido (2019)** no encontró cambios luego de un año. La materia orgánica y ciertos minerales del suelo, como arcillas y óxidos de hierro, pueden reaccionar lentamente a los cambios ambientales, lo que retrasa o minimiza cualquier variación en el pH **(Brady y Weil, 2008)**. Por tanto, el tiempo transcurrido es relativamente corto para apreciar cambios significativos en el pH del suelo de los sitios Restaurados.

Concentración de Carbono Total (Ct)

Contrario a lo esperado no hubo cambios significativos en la concentración de Ct luego de seis meses de lluvia. Sin embargo, el valor promedio es mayor en lluvia que en seca (**Tabla 8**). Varios trabajos han reportado que la concentración de carbono

total es mayor en época seca **(García-Oliva et al., 2006; Singh et al., 2018; Jiménez-Hernández, 2021)**. Sin embargo, también se ha visto que la comunidad microbiana puede absorber parte del carbono disponible en el suelo durante las lluvias para su actividad metabólica **(Sollins et al., 1996; Paul, 2014)**, lo cual limita el aumento en los niveles de Ct y evita un cambio significativo. Por tanto, no es posible detectar las variaciones en el Ct luego de seis meses de lluvias.

Concentración de Nitrógeno Total (Nt)

Contrario a lo esperado, Nt no varió después de seis meses de lluvias (**Tabla 8**). Durante la lluvia, a pesar de que el proceso de mineralización se acelera, el nitrógeno liberado puede ser rápidamente inmovilizado por microorganismos del suelo para su propio crecimiento **(Paul, 2014)**. Esto evita que el nitrógeno se acumule en forma mineral y mantenga estable la concentración de Nt. Por tanto, seis meses aún es poco tiempo para detectar variaciones del Nt con la estacionalidad.

Relación C:N

Contrario a lo esperado, la relación C:N no varió luego de seis meses de lluvias (**Tabla 8**). A pesar de las lluvias, la descomposición de la materia orgánica en el suelo puede ser un proceso lento, especialmente si la calidad de la materia orgánica inicial es recalcitrante o si el suelo no cuenta con temperaturas óptimas **(Stevenson y Cole, 1999; Paul, 2014)**. Las lluvias por sí solas pueden no ser suficientes para acelerar significativamente la descomposición y liberar nutrientes que alterarían la relación C:N en tan solo seis meses **(Chapin et al., 2011; Paul, 2014)**. Por tanto, seis meses aún es poco tiempo para detectar variaciones en la relación C:N.

Concentración de Nitrógeno Inorgánico (NO_3^- y NH_4^+)

Contrario a lo esperado, la concentración de NO_3^- fue mayor en época de lluvia que en época seca (**Figura 9**). Por otro lado, la concentración de NH_4^+ no varió luego de seis meses, contrario a lo esperado (**Figura 10**). Durante la época de lluvias, el suelo suele tener mayor humedad y oxígeno, lo que favorece a las bacterias nitrificantes que convierten el amonio ($NH4^+$) en nitrato ($NO3^-$) **(Wallenstein y Weintraub, 2008; Paul, 2014)**. Este proceso tiende a incrementar los niveles de $NO3^-$ en el suelo en comparación con los de la época seca. Además, el $NO3^-$ es una forma de nitrógeno más móvil y soluble en el agua que el $NH4^+$, lo que facilita su acumulación en la zona de raíces durante las lluvias, especialmente si las precipitaciones son moderadas y no se produce lixiviación significativa **(Davidson et al., 1993)**. En contraste, el $NH4^+$ tiende a fijarse en las partículas del suelo debido a su carga positiva, lo que limita su movilidad y no experimenta aumentos significativos, incluso en condiciones de humedad **(Inomura et al., 2018)**. Por tanto, luego de seis meses, es posible detectar mayor concentración de $NO3^-$ en el suelo de los sitios Restaurados posiblemente debido a su mayor movilidad y solubilidad en agua, contrario al $NH4^+$ que tiende a ser menos móvil.

Relación NO_3^-:NH_4^+

Contrario a lo esperado, la relación NO_3^-:NH_4^+ fue mayor en época de lluvia que en época seca (**Tabla 8**). Esto está relacionado con el mayor concentración de NO_3^- en época de lluvia también (**Tabla 8**). La lluvia y la mayor humedad en el suelo pueden acelerar la descomposición de la materia orgánica, liberando tanto NH_4^+ como NO_3^- **(Vitousek y Matson, 1985)**. No obstante, el NH_4^+ es rápidamente convertido en NO_3^- por la nitrificación, lo que puede llevar a un incremento en los niveles de NO_3^- en comparación con el NH_4^+ **(Davidson y Swank, 1986)**. Por tanto, luego de seis meses de lluvia la relación NO_3^-:NH_4^+aumenta por el aumento de NO_3^-.

Concentración de Fósforo Total (Pt)

Contrario a lo esperado, el Pt no varió después de seis meses de lluvia (**Tabla 8**). **Jiménez-Hernández (2021)** también reporta que el Pt en el suelo luego de seis meses no cambió significativamente. El Pt en el suelo suele estar presente en formas complejas y requiere un tiempo prolongado para ser mineralizado y convertirse en formas inorgánicas disponibles para las plantas **(Cross y Schlesinger, 1995)**. En suelos donde el fósforo está en formas orgánicas más estables, como en climas tropicales, la mineralización puede no ocurrir de manera rápida **(Turner y Haygarth, 2001)**. Esto podría explicar por qué el Pt no mostró variación significativa en seis meses, ya que ese tiempo podría ser insuficiente para observar cambios en reservas orgánicas más estables.

Concentración de Fósforo Disponible (Pa)

Contrario a lo esperado, el Pa no varió después de seis meses de lluvia (**Tabla 8**). Durante el periodo de lluvias, podría haber procesos de lavado y lixiviación, en los que parte del Pa (especialmente en formas inorgánicas solubles) se desplaza fuera de la capa superficial del suelo **(Cross y Schlesinger, 1995)**. Sin embargo, este proceso de pérdida puede compensarse con la descomposición de la materia orgánica y la mineralización de fósforo orgánico en el suelo, que repone las formas inorgánicas **(Turner y Haygarth, 2001)**. Esta dinámica de reposición podría haber mantenido constante el nivel Pa, ya que las pérdidas y ganancias estuvieron en equilibrio.

Efectos del cambio de uso y la restauración en las propiedades del suelo

Los suelos estériles mineros presentan desafíos significativos para la restauración. Estos suelos se caracterizan por una estructura edáfica está totalmente ausente **(Arranz-González, 2011)** por lo que existe una baja cantidad de nutrientes y materia orgánica, escasa capacidad de retención de agua por su composición mayormente rocosa, y exposición directa a altas temperaturas y radiación, por lo que estos suelos ofrecen condiciones poco favorables para el establecimiento de la vegetación **(Tormo-Blanes, 2007)**. Sin embargo, bajo condiciones adecuadas de colonización o siembra, con el tiempo puede desarrollarse un horizonte superficial delgado con estructura granular, estrechamente asociado a la presencia de raíces **(Johnson y**

Skousen, 1995). Aunque a corto plazo los cambios en las propiedades del suelo pueden no ser evidentes, estas diferencias tienden a manifestarse con mayor claridad a lo largo del tiempo **(Carrasco-Carballido, 2019)**. Para la reforestación, incluso una pequeña cantidad de tierra fina puede ser suficiente para iniciar la recuperación de estos terrenos **(Limstrom, 1960)**. Por lo tanto, la recuperación de los suelos mineros estériles depende de la implementación de estrategias adecuadas que promuevan la mejora gradual de sus propiedades físicas y químicas, permitiendo así un avance sostenido hacia la restauración ecológica.

Comportamiento de las propiedades físicas de los suelos

Según lo esperado, los suelos de los sitios ER-6, ER-5 y ER-3 presentan menores valores de profundidad en comparación con el sitio Conservado (**Figura 3A y Tabla 9**), y en ER-5 y ER-3 presentan mayores valores de pedregosidad en comparación con el sitio Conservado (**Figura 3B y Tabla 9**) lo que indica que el proceso de restauración aún es insuficiente para alcanzar las condiciones de referencia. Este resultado sugiere que el tiempo transcurrido desde el inicio de la restauración no ha sido suficiente, dado que los procesos naturales de recuperación del suelo suelen requerir más de una década para mostrar mejoras significativas en propiedades como la profundidad **(Peña-Ramírez, 2013)**. Los suelos afectados por actividades como la minería suelen estar completamente desprovistos de materia orgánica y nutrientes esenciales **(Peña-Ramírez, 2013)**, por lo que, si bien esperamos que el proceso de restauración implementado por la empresa muestre avances prometedores, es comprensible que, al encontrarse en sus etapas iniciales, requiera un periodo prolongado para que los cambios se consoliden y alcancen niveles cercanos a los del sitio Conservado. Estas variaciones en la profundidad del suelo pueden atribuirse al manejo realizado por la empresa, incluyendo la cantidad de suelo depositado en cada área, y a factores como la pendiente, el drenaje y la erosión, que contribuyen a una notable heterogeneidad espacial en la profundidad del suelo **(Campo-Alves, 2003)**. Por tanto, es necesario homogeneizar las prácticas en cuanto a deposición de suelos de forma que se logren profundidades similares a las encontradas en el sitio Conservado (12.89 ± 0.94 cm), en cada uno de los sitios Restaurados afectados.

Por otra parte, y contrario a lo esperado, el sitio ER-7 muestra los mejores avances tanto en Profundidad como en Pedregosidad con respecto al sitio Conservado (**Figuras 3A y 3B y Tabla 9**). Aunque este sitio todavía no tiene diez años de establecido, parece ser que las acciones ejecutadas por la empresa han logrado buenos resultados en términos de obtener valores similares a los del sitio Conservado. Una mayor profundidad de suelo y menor pedregosidad garantiza un mayor volumen de materia orgánica para que las plantas puedan crecer y expandir sus raíces **(Peña-Ramírez, 2013)**. Por tanto, ER-7 destaca como un sitio Restaurado que muestra un avance positivo en el proyecto de restauración ecológica que lleva a cabo la empresa.

De manera general en todos los sitios Restaurados, los valores de pedregosidad son mayores que en el Conservado (**Figura 3B, Tabla 9**). La alta pedregosidad, no solo afecta la estructura física del suelo, sino que también influye en su capacidad de retención de agua **(Arranz-González, 2011)**. Cuando los suelos tienden a ser más someros y a presentar un mayor volumen de roca, la retención de humedad puede dificultarse **(Martínez-Garza et al., 2013)**. Sin embargo, los valores de CGA en todos los sitios Restaurados son similares a los encontrados en el sitio Conservado (**Figura 4, Tabla 9**). Esto sugiere que los suelos de los sitios Restaurados son capaces de retener suficiente agua.

Los valores de densidad aparente de todos los sitios Restaurados son superiores a los encontrados en el sitio Conservado (**Figura 3C, Tabla 9**). La densidad aparente de los suelos es una medida de la compactación del suelo y está directamente relacionada con su estructura, pedregosidad y humedad **(Arranz-González, 2011)**. Los suelos en áreas mineras suelen presentar valores de densidad mayores que los suelos naturales, lo que representa un obstáculo en su rehabilitación **(Leirós de la Peña et al., 1995)**. Sin embargo, los valores de densidad en este estudio sorprendentemente no alcanzaron niveles tan altos como los reportados en suelos compactados por actividades ganaderas, donde un rango de 1.3 a 1.75 g/cm³ puede limitar el crecimiento de raíces debido a la compactación y la falta de aireación **(Peña-Ramírez, 2013)**. El valor de densidad más alto se registró en el sitio perturbado, con 1.48 ± 0.11 g/cm³ (**Tabla 9**), dentro del rango crítico, pero sin llegar a ser extremadamente elevado. Los otros sitios restaurados mostraron valores mayores que el sitio conservado, pero sin alcanzar el rango desfavorable. Esto indica que la compactación de los suelos en los sitios Restaurados es baja, lo cual favorece la penetración y expansión de las raíces, permitiendo un desarrollo radicular más saludable y profundo. Además, la adecuada aireación en estos suelos puede mejorar la retención de agua y contribuir a un ambiente favorable para el crecimiento vegetal **(Peña-Ramírez, 2013)**. Por tanto, la densidad de los suelos de los sitios Restaurados se encuentra en niveles que resultan aceptables para el establecimiento de las plantas, no obstante, sería recomendable disminuir estos valores de densidad de manera que sean similares al sitio Conservado.

Comportamiento de las propiedades fisicoquímicas y químicas de los suelos

pH

En este estudio, contrario a lo esperado, los suelos en los sitios Conservado, Perturbado y Restaurados presentan valores de pH alcalinos, superiores a 7, aunque el sitio Conservado muestra un pH ligeramente más bajo en comparación con los Restaurados (**Figura 4, Tabla 10**). Un pH ligeramente alcalino es favorable en suelos de SBC porque promueve la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana, cruciales para el crecimiento de la vegetación nativa **(Martínez-Yrízar, 1995; Curtin et al., 1998; Neina, 2019)**.

Los valores alcalinos en los sitios Restaurados sugieren que las prácticas aplicadas han promovido un ambiente adecuado para la vegetación adaptada a estas condiciones, impulsando la recuperación ecológica a pesar de que también se ha visto que un pH superior a 7 podría tener un impacto negativo en el desempeño de las plantas **(Mohan-Kumar y Ghoshal, 2017)**. A pesar de que algunos estudios han observado un pH ácido en sitios perturbados **(Tiwari et al., 2019; da Silva et al., 2021)**, otros, como **Fuentes-Hernández et al. (2019)**, han encontrado valores alcalinos en suelos perturbados y conservados, indicando que no siempre hay acidificación tras un cambio de uso de suelo. Esto subraya la influencia del tiempo de perturbación sobre el pH **(Jiménez-Hernández, 2021)**, sugiriendo que, en sitios restaurados, el pH tiende a estabilizarse en un rango alcalino conforme avanza la restauración.

El sitio ER-3 es el único que presenta valores de pH similares al Conservado. Sin embargo, destaca por mostrar una mayor variabilidad en comparación con el resto de los sitios Restaurados, como se observa en el amplio rango que se extiende hacia valores más bajos (**Figura 4**). Esta variabilidad podría explicarse por el hecho de que, como parte del proyecto de restauración, en este sitio se colocó suelo proveniente del sitio previamente perturbado (con vegetación conservada) una vez cesó la explotación. Esto implica que el pH del suelo en ER-3 probablemente conserva ciertas características del sitio Conservado, pero también refleja una fase inicial de estabilización. Dado que ER-3 es el sitio más recientemente establecido, es posible que aún no haya transcurrido el tiempo suficiente para que el pH alcance un patrón más homogéneo, como se observa en los otros sitios Restaurados.

Concentración de Carbono Total (Ct)

Según lo esperado el Ct de los sitios Restaurados ER-6, ER-5 y ER-3 es menor que el del sitio Conservado (**Figura 5A, Tabla 11**). Estudios previos que señalan que una cobertura vegetal robusta suele asociarse con mayores niveles de carbono en el suelo **(Lal, 2005)**. **Tripathi y Singh (2009)** y **Johnson y Wedin (1997)** observaron una disminución en el Ct en áreas de pastizal en comparación con selvas maduras, atribuyendo esta reducción a la pérdida de vegetación densa, que limita el aporte de materia orgánica al suelo. Es por ello que es lógico encontrar tan bajo Ct en estos suelos mineros que han sido totalmente desprovistos de materia orgánica.

En este estudio, aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la concentración de Ct entre el sitio Conservado y el Perturbado (contrario a lo esperado), la concentración de Ct en el Conservado fue más de dos veces mayor que en el Perturbado, lo que sugiere un bajo nivel de Ct en este último, según lo esperado (**Figura 5A, Tabla 11**). De manera similar, **Jiménez-Hernández (2021)** tampoco encontró diferencias significativas en Ct entre un sitio conservado y otro perturbado, aunque los valores en el sitio conservado fueron casi el doble de los del perturbado.

Por otra parte, contrario a lo esperado ER-7 presentó valores comparables al sitio Conservado, lo cual sugiere un avance positivo en la recuperación de este sitio donde

la vegetación parece estar en una fase de recuperación inicial. Esto sugiere que la biomasa en crecimiento en ER-7 está comenzando a contribuir al ciclo de carbono **(Lal, 2005)**, un indicio positivo en el proceso de restauración. En contraste, ER-3 presentó valores similares al sitio Perturbado, mientras que ER-5 y ER-6 mostraron los niveles más bajos de Ct, incluso inferiores al sitio Perturbado, lo que podría indicar que en estos sitios la cobertura vegetal es aún insuficiente para contribuir significativamente a la acumulación de carbono en el suelo. **Jiménez-Hernández (2021)** también observó que el carbono no aumenta continuamente con la sucesión, lo cual puede estar relacionado con factores específicos de cada sitio y sus condiciones de restauración. Dado que el Ct es un indicador efectivo de la restauración en ecosistemas forestales **(Costantini et al., 2016)**, estos hallazgos resaltan la necesidad de fortalecer la cobertura vegetal y fomentar una mayor acumulación de materia orgánica en los sitios ER-6, ER-5 y ER-3 para alcanzar un estado de recuperación más avanzado. Esto es relevante, ya que la deforestación podría estar contribuyendo a la baja de Ct en suelos afectados por cambios de uso del suelo. La acumulación de carbono en el suelo es mayor en áreas con mayor densidad de especies fijadoras de nitrógeno **(Paul et al., 2002)** lo que sugiere que promover su establecimiento podría beneficiar el proceso de restauración. Adicionalmente se ha visto que aproximadamente el 90% de las entradas de carbono al suelo en sitios perturbados provienen de la descomposición de raíces finas **(Morales-Romero et al., 2015)**. Por tanto, es necesario perfeccionar el manejo en cuanto al suministro de Ct en los sitios Restaurados afectados.

Concentración de Nitrógeno Total (Nt)

En el presente estudio, como era esperado, las concentraciones de Nt en el sitio Conservado son mayores que en el sitio Perturbado y en los sitios Restaurados (**Figura 5B, Tabla 11**). Se ha visto que después de dos años no se recuperaron las concentraciones de nitrógeno en sitios bajo restauración **(Jiménez-Hernández, 2021)**. En suelos con vegetación madura, el nitrógeno es retenido en la biomasa y reciclado a través de la descomposición de materia orgánica **(Saynes et al., 2004; Jara et al., 2009)**. Aunque ER-3 es estadísticamente similar al sitio Conservado, el valor de Nt en el Conservado es más del triple de ER-3, lo que indica que este sitio restaurado tiene una baja concentración de Nt. Los otros sitios Restaurados presentaron valores de Nt comparables al sitio Perturbado, sugiriendo una concentración limitada de nitrógeno. El bajo Nt en el sitio Perturbado podría estar relacionado con la pérdida de vegetación y actividad microbiana **(Saynes et al., 2004)**. En estudios de restauración, el aumento de Nt en suelos restaurados se asocia con el establecimiento de especies fijadoras de nitrógeno o leguminosas **(Saynes et al., 2004)**. En los sitios Restaurados, ER-7, ER-6 y ER-5 presentan bajos valores de Nt, lo que indica que el establecimiento de especies leguminosas podría aún no ser suficiente para la recuperación del nitrógeno en el suelo o que el establecimiento de especies no leguminosas podría estar retrasando la recuperación del nitrógeno en el suelo. Se ha propuesto que el ciclo del nitrógeno en la SBC es un ciclo abierto debido

a las altas pérdidas de nitrógeno por lixiviación de sus formas inorgánicas y por emisiones **(Martínez-Yrízar, 1995)**, con menores pérdidas en suelos menos perturbados **(Jaramillo y Sanford, 1995)**. Asimismo, durante las etapas tempranas de la sucesión de un sitio perturbado, se ha visto que el principal nutriente limitante es el nitrógeno **(Campo y Vázquez-Yanes, 2004)**. Esto explica la tendencia general hacia una disminución de nitrógeno en suelos sometidos a algún grado de perturbación en comparación con suelos conservados **(Johnson y Wedin, 1997; Tripathi y Singh, 2009; Jiménez-Hernández, 2021)** y destaca al Nt como una de las propiedades del suelo que se afectan con su cambio de uso. Una vez más se aprecia el patrón descrito anteriormente, en el cual, ER-3 es el único sitio Restaurado que se asemeja al Conservado y mantenemos la asunción de que podría deberse al relativamente corto tiempo que tiene la colocación del suelo directo del sitio previamente perturbado en el cual no ha transcurrido tiempo suficiente como para observar el patrón de Nt del resto de los sitios Restaurados.

Relación C:N

La relación C:N puede informar cómo es la dinámica de estos nutrientes en los sitios Restaurados. Esta relación tiende a ser más baja en ecosistemas maduros, donde el ciclo de nitrógeno es estable y continuo **(Vitousek y Matson, 1993; Morales-Romero et al., 2015)**. Contrario a lo esperado, la similitud en la relación C:N entre los sitios (**Figura 5C, Tabla 11**) sugiere que el nitrógeno disponible se ha estabilizado en la mayoría de los sitios, probablemente debido a la acumulación de residuos orgánicos de especies vegetales de crecimiento rápido en sitios Restaurados, como se ha reportado en estudios de bosques secundarios **(Saynes et al., 2005; Carrasco-Carballido et al., 2019, Márquez-Torres, 2022)**. A pesar de que los sitos Restaurados tienen contenidos absolutos bajos de Ct y Nt porque la acumulación de materia orgánica todavía es limitada, la relación C:N es similar entre todos los sitios Restaurados y con respecto al Conservado, sugiriendo que el aporte de residuos orgánicos de especies pioneras y su descomposición han equilibrado los niveles relativos de C y N en el ecosistema. Esto indica un avance en la recuperación del suelo y sugiere que la restauración está logrando estabilizar las funciones básicas del ecosistema. **Carrasco-Carballido et al. (2019)** reportan un aumento en la relación C:N luego de dos años debido a la alta densidad de especies leguminosas reclutadas, que producen gran cantidad de hojarasca. Por otra parte, se ha visto que la relación C:N tiende a ser mayor en bosques primarios que en bosques secundarios sugiriendo un mejoramiento en las condiciones de estos últimos en cuando a calidad de la materia orgánica de los suelos, planteando que son suelos con buena calidad de materia orgánica con una relación de 17 a 20 **(Saynes et al., 2005)**. Por otra parte, en suelos perturbados, la calidad de la materia orgánica puede ser similar a la de suelos no perturbados, especialmente en los primeros 2 cm de profundidad, donde se han observado mayores concentraciones de nutrientes disponibles, C y N mineralizables, además de una mayor biomasa microbiana **(Carter y Rennie, 1982)**.

Concentración de Nitrógeno Inorgánico (NO_3^- y NH_4^+)

Las concentraciones de NO_3^- y NH_4^+ están relacionadas entre sí y permiten informar sobre la recuperación de los sitios Restaurados. Contrario a lo esperado, la concentración de NO_3^- en ER-6, ER-5 y ER-3 es similar al del sitio Conservado (**Figura 6A y Tabla 12**). Solamente, ER-7 es similar al sitio Conservado en cuanto a este parámetro (**Figura 6A y Tabla 12**). Por otra parte, contrario a lo esperado, ER-6 y ER-3 presentaron concentraciones de NH_4^+ similares a los encontrados en el sitio Conservado (**Figura 6B y Tabla 12**). Se han encontrado menores niveles de NO_3^- en sitios perturbados en relación con sitios conservados **(Johnson y Wedin, 1997; Tripathi y Singh, 2009; Jiménez-Hernández, 2021)**. Se ha encontrado que después de dos años no se recuperó la concentración de NO_3^- **(Jiménez-Hernández, 2021)**. El NO_3^- más elevado en el sitio Conservado coincide con estudios que indican que la vegetación nativa mejora la disponibilidad de nutrientes a través de su sistema radicular y de la mineralización **(Vitousek y Matson, 1988; Gregorich et al., 1994)**. Por otra parte, la mayor concentración de NH_4^+ en el sitio Conservado respalda estudios que asocian la presencia de vegetación con la estabilidad del ciclo del nitrógeno en suelos **(Vitousek y Matson, 1988; Gregorich et al., 1994)**, así como un ciclo del nitrógeno más estable en comparación con el sitio Perturbado. Los bajos niveles en el sitio Perturbado son coherentes con investigaciones donde la pérdida de vegetación y con ello, de la materia orgánica, contribuye a la volatilización y menor disponibilidad de amonio **(Vitousek y Melillo, 1979)**.

La notable variabilidad observada en el sitio Conservado, especialmente en la concentración de NO_3^-, sugiere una mayor heterogeneidad ambiental en comparación con los sitios Restaurados. Esta dispersión en los datos puede atribuirse a la complejidad ecológica propia de un ecosistema maduro, donde factores como la acumulación desigual de materia orgánica, la actividad microbiana y la dinámica de los ciclos de nutrientes generan diferencias significativas entre microhábitats. Por ejemplo, estudios han demostrado que la variabilidad espacial en la disponibilidad de N está estrechamente relacionada con la heterogeneidad de la materia orgánica y la actividad microbiana en suelos forestales maduros **(Smith et al., 2015)**. En el caso del NH_4^+, aunque la variabilidad en el sitio Conservado es menos pronunciada, aún es perceptible y puede reflejar una mayor retención del nutriente en ciertos puntos del suelo, posiblemente debido a la formación de complejos orgánicos-estables **(Jones et al., 2005)**. Así, la amplia dispersión en el sitio Conservado no debe interpretarse como una anomalía, sino como una expresión natural de un ecosistema funcional y dinámico **(Fisher y Binkley, 2000)**.

La alta disponibilidad de NH_4^+ y NO_3^- en los suelos de los sitios Restaurados que se asemejan al suelo del sitio Conservado contrario a lo que podría pensarse, podría ser perjudicial. Como se vio anteriormente, estos sitios tendieron a presentar poca profundidad, alta pedregosidad, tendencia general a un aumento en la densidad aparente, altos valores de pH y bajos Ct y Nt. Pareciera extraño que sus niveles de NH_4^+ y NO_3^- fueran una buena señal. Más bien, constituyen una preocupación que

debe abordarse en futuras intervenciones en estos sitios. La forma en que se presentan estos nutrientes es más susceptible a lixiviación, con lo cual, las lluvias, así como los riegos que realiza la empresa, pueden ocasionar que se pierdan estos nutrientes y en correspondencia, la fertilidad del suelo. Estos suelos que han sido restablecidos sobre un terreno minero no son totalmente estables por el poco tiempo que ha transcurrido y la falta de cobertura que los estabilice **(Gregorich et al., 1994; Arranz-González, 2011)** por ello, el hecho de que se parezcan en cuanto a contenido de estos nutrientes al sitio Conservado no es muy informativo. Los sitios Conservados generalmente presentan mayores concentraciones de nitrógeno inorgánico **(Hante y Kinzig, 1993; Gregorich et al., 1994)** pero sus suelos no presentan estas afectaciones. Asimismo, se sabe que la transformación de N en el suelo se afecta por la deforestación **(Tripathi y Sing, 2009)** por lo que durante la sucesión temprana (primeros cinco años), el nitrógeno inorgánico disminuye debido a la demanda de la vegetación en crecimiento **(Lebrija-Trejos et al., 2010)** y se espera que se pueda recuperar con la revegetación **(Carrasco-Carballido et al., 2019)**. Por tanto, es preciso mejorar las propiedades previamente abordadas para ver una mejora en las concentraciones de nitrógeno inorgánico en los suelos de los sitios Restaurados que no necesariamente se traduce en un aumento en su concentración como el comportamiento en el sitio Conservado, sino en un comportamiento similar al presentado por ER-7 para el caso de NO_3^-, y NH_4^+ para el caso de ER-7 y ER-5. En particular, ER-7 muestra los mejores avances en términos de recuperación de sus propiedades físicas y químicas y en sentido global, en la recuperación de la fertilidad.

Relación NO_3^-:NH_4^+

Contrario a lo esperado, la proporción de NO_3^-:NH_4^+ fue similar entre el sitio Conservado, el Perturbado y los sitios Restaurados (**Figura 6C, Tabla 12**). Esto sugiere que, a pesar de las diferencias esperadas en las condiciones de suelo entre estos sitios, la relación NO_3^-:NH_4^+ en la zona de raíces no se alteró significativamente. La proporción de NO_3^-:NH_4^+ en el suelo es un factor crítico que regula la absorción relativa de nutrientes en las plantas **(Sonneveld, 2002)**. Aunque el NO_3^- es la forma predominante de nitrógeno en la solución del suelo, el NH_4^+ puede desempeñar un papel beneficioso en la nutrición de las plantas en cantidades moderadas **(Gashaw y Mugwira, 1981; Sonneveld, 2002)**. Esto se debe a que el NH_4^+ puede ser asimilado cuando hay suficiente poder reductor y esqueletos carbonados disponibles para la síntesis de aminoácidos **(Mengel y Kirkby, 1987)**.

La similitud observada en el pH entre los sitios Perturbado y Restaurados (**Figura 4, Tabla 10**) refuerza la interpretación de que las concentraciones de NH_4^+ y NO_3^- no variaron lo suficiente como para modificar significativamente el balance iónico del suelo. La presencia de NH_4^+ en la zona de raíces puede reducir el pH debido a la secreción de H^+ generada durante los procesos de nitrificación **(Tabatabaei et al., 2008)**, lo cual puede alterar la absorción de nutrientes. Sin embargo, en este caso, la estabilidad del pH sugiere que las concentraciones de NH_4^+ no alcanzaron niveles suficientemente altos como para inducir cambios significativos en los valores de pH

entre sitios. Este equilibrio de pH y la proporción de NO_3^-:NH_4^+ también podría estar permitiendo una absorción óptima de ambos nutrientes, lo que favorece el crecimiento de las plantas al evitar problemas asociados con la acumulación excesiva de NH_4^+, que pueden incluir inhibición en la fotosíntesis por toxicidad **(Givan, 1979; Frantz et al., 1982; Norisada y Kojima, 2005)**.

La similitud en la proporción NO_3^-:NH_4^+ entre los sitios podría también estar relacionada con la capacidad de las plantas para ajustar su absorción de NH_4^+ y NO_3^- en función de su disponibilidad, sin favorecer desproporcionadamente alguna de estas formas de nitrógeno. Equilibrar esta proporción es clave para optimizar la absorción de nutrientes y mantener un pH adecuado en el suelo, ya que el menor crecimiento de las plantas en suelos con altas concentraciones de NH_4^+ puede deberse a la falta de NO_3^- y al incremento en la demanda de carbohidratos para la asimilación y detoxificación de NH_4^+ **(Tabatabaei et al., 2008)**. Esto podría explicar por qué, pese a la expectativa de diferencias entre sitios, la proporción NO_3^-:NH_4^+ y el pH fueron similares en el sitio Conservado, el Perturbado y los Restaurados. por tanto, los sitios Restaurados han alcanzado una estabilidad en la proporción de NO_3^-:NH_4^+.

Concentración de Fósforo Total (Pt)

Según lo esperado, el Pt es mayor en el sitio Conservado con respecto al Perturbado (**Figura 7A, Tabla 13**). Esto destaca el efecto de la vegetación densa en la acumulación de nutrientes a través de la hojarasca y la liberación de fósforo orgánico **(Maranguit et al., 2017)**. En el sitio Perturbado, los valores bajos sugieren pérdida por erosión **(Maranguit et al., 2017)**. Asimismo, y según lo esperado, el Pt de todos los sitios Restaurados fue similar al encontrado en el sitio Conservado (**Figura 8A, Tabla 13**). Se ha visto que el Pt está más asociado a la estacionalidad que al grado de perturbación de los sitios **(Valdespino et al., 2009)**, llegando a ser mayor en sitios bajo árboles remanentes que en sitios abiertos **(Jara et al., 2009)**. Asimismo, durante la sucesión primaria, la principal limitación de nutrientes es el nitrógeno y en etapas posteriores, cambia a fósforo **(Campo y Vázquez-Yanes, 2004)**. Por estos motivos parece ser que no existieron afectaciones en los suelos de los sitios restaurados en cuanto a Pt.

Concentración de Fósforo Disponible (Pa)

Según lo esperado, la concentración de Pa en el sitio Conservado es mayor que en el sitio Perturbado (**Figura 7B, Tabla 13**). Este patrón podría estar vinculado a la actividad biológica y la acumulación de material orgánico en descomposición en el sitio Conservado, lo cual favorece un suministro continuo de este nutriente **(Maranguit et al., 2017)**. En contraste, la baja concentración de Pa en el sitio Perturbado sugiere la pérdida de la capacidad del suelo para liberar fósforo. Este hallazgo se alinea con estudios que han demostrado que la perturbación del suelo, incluso sin labranza, puede reducir la absorción de fósforo al disminuir la efectividad de la simbiosis micorrízica, un factor clave en la absorción de nutrientes como el

fósforo **(O'Halloran et al., 1986)**. Se ha reportado que la concentración de Pa puede variar considerablemente, con la vegetación nativa, especialmente aquella con raíces profundas, facilitando la absorción de P de capas más profundas del suelo y reponiendo estos nutrientes en la superficie durante la descomposición **(Morales-Romero et al., 2015)**. Sin embargo, en sitios sucesionales tempranos, la concentración de Pa podría ser menor debido a la incapacidad de la vegetación para generar raíces profundas que favorezcan el acceso al fósforo, un fenómeno también influenciado por la reducción de la actividad micorrízica tras la perturbación del suelo. **Maranguit et al. (2017)** reportaron que la concentración de Pa disminuye con el cambio de uso de suelo. En este sentido, contrario a lo esperado, el Pa de ER-3 es similar al encontrado en el sitio Conservado, mientras que, según lo esperado, el resto de los sitios Restaurados presentaron valores de Pa significativamente menores que los encontrados en el sitio Conservado. La explicación en este caso parece ser similar a la encontrada para el NO_3^- y NH_4^+. No por el hecho de que estos nutrientes presenten los mismos niveles del sitio Conservado significa que esto sea una ventaja, porque el Pa también es más soluble y puede lixiviarse con mayor facilidad. Por tanto, es necesario optimizar la intervención en ER-3 hacia una mayor capacidad de retención de nutrientes, en este caso, de Pa.

Entre los sitios Restaurados analizados, ER-7 sobresale por las óptimas propiedades físicas y químicas del suelo, reflejando un avance significativo en el proceso de restauración llevado a cabo por la empresa. Este sitio podría servir como modelo para mejorar el diseño de futuras estrategias de restauración. Por otro lado, el sitio ER-3, debido a su reciente establecimiento, permite identificar errores en el manejo del suelo que pudieran no resultar tan evidentes en los demás sitios Restaurados. Corregir estos aspectos mediante acciones específicas contribuirá a alcanzar una restauración de alta calidad y efectividad.

Efecto de las propiedades del suelo con la estructura, composición y desempeño de las plantas leñosas

Relación entre propiedades del suelo y vegetación en estación seca y de lluvia

El análisis de correlaciones evidenció que variables clave del suelo, como el nitrógeno total (Nt) y el pH, se relacionan estrechamente con la estructura, composición y sobrevivencia de la vegetación independientemente de la estación.

Tanto en estación seca como de lluvia, se observó que suelos con mayores concentraciones de Nt y un pH más bajo favorecen un aumento en la densidad de plantas y no leguminosas, posiblemente debido a la mayor disponibilidad de formas solubles de nitrógeno (por ejemplo, nitrato, NO_3^-) a bajo pH que facilita el establecimiento inicial de las plantas **(Marschner, 2012)** y resulta un recurso indispensable para las plantas no leguminosas sobre todo en sitios pobres en N **(Paul et al., 2002)**.

En estas mismas condiciones, se registró una disminución en la sobrevivencia a un año, lo que podría atribuirse a una competencia intensificada por recursos (agua, luz

y nutrientes) **(Wright et al., 2010)** y a la posible toxicidad generada por la solubilización de elementos como el aluminio en suelos con pH bajo **(Delhaize y Ryan, 1995; Wright et al., 2010)**.

Otras propiedades clave del suelo como el fósforo total (Pt) y el carbono total (Ct) también se relacionaron estrechamente con la composición y sobrevivencia de las plantas leñosas en la estación seca. Se encontró que altos niveles de Pt se relacionan con un aumento en la densidad de especies, lo cual se explica por la función esencial del fósforo en la formación de raíces y en la fotosíntesis, procesos fundamentales para el crecimiento **(Taiz y Zeiger, 2010; Vitousek et al., 2010)**. Durante las etapas tempranas de sucesión las especies pioneras hacen un uso más eficiente de los recursos **(Badano et al., 2009; Chapin et al., 2011; Williams-Linera et al., 2011)** como el fósforo que resulta esencial en la fotosíntesis, lo que favorece su establecimiento y crecimiento acelerado en etapas tempranas de sucesión natural.

Sorprendentemente, se observó que menores concentraciones de Ct se asocian con una mayor densidad de especies, lo que podría estar relacionado con procesos ecológicos característicos de sitios en restauración. Una posible explicación es que, en suelos jóvenes y en etapas tempranas de restauración, la materia orgánica aún no se ha acumulado en grandes cantidades, lo que genera condiciones más dinámicas en términos de fertilidad **(Adjei et al., 2023)**. Esto favorece la colonización de una mayor densidad de especies, especialmente las leguminosas pioneras, que pueden establecerse en suelos con menor Ct **(Sui et al., 2011; Smith-Martin et al., 2017)**. Además, en sitios con alta densidad de especies, hay un mayor número de raíces activas y exudados radicales, lo que puede estimular la actividad microbiana y acelerar la descomposición de la materia orgánica **(Clemmensen et al., 2013)**. Esto explicaría por qué, a pesar de la alta densidad de especies clave como las pioneras, los niveles de Ct permanecen bajos: la rápida incorporación y descomposición de materia orgánica impide que se acumulen reservas estables de carbono en el suelo.

En este sentido, la relación observada podría reflejar un estado transitorio de la restauración, en el que el suelo aún no ha desarrollado una reserva significativa de carbono, pero es capaz de sostener una comunidad de especies pioneras gracias a la rápida disponibilidad de nutrientes derivados de la descomposición microbiana. Conforme el ecosistema madure y la acumulación de hojarasca y biomasa aumente, es posible que los niveles de Ct se incrementen, y que la composición y densidad de especies se estabilicen.

Efecto residual de las condiciones de la estación seca en la estación de lluvias

Los altos valores de Pt y los bajos valores de Ct observados en la estación seca parecen influir en la dinámica de la vegetación en la siguiente temporada siguiendo el mismo patrón observado seis meses antes, en la estación de lluvia. Como se mencionó anteriormente, el fósforo juega un papel clave en el desarrollo radicular y la fotosíntesis **(Taiz y Zeiger, 2010; Vitousek et al., 2010)**, lo que puede generar un efecto positivo acumulativo: al favorecer un sistema radicular más robusto durante la

estación seca, las plantas pueden mejorar su capacidad de absorción de agua y nutrientes durante la estación de lluvias **(Tilman, 1987)**.

Por otro lado, la baja concentración de Ct en la estación seca, atribuida a una alta actividad microbiana y rápida descomposición de materia orgánica **(Clemmensen et al., 2013)**, podría haber facilitado la mineralización de nutrientes esenciales. Este proceso aseguraría una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo durante la estación de lluvias, beneficiando a las especies que pueden aprovecharlos rápidamente.

Conclusiones

La minería genera graves perturbaciones en ecosistemas de SBC en la estructura y composición de plantas leñosas, así como en las propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas de los suelos.

La restauración ecológica permite recuperar la estructura y composición de la vegetación, así como, las propiedades del suelo, aunque sus efectos pueden ser más evidentes en un plazo de tiempo superior a un año.

Aunque los sitios Restaurados no se encuentran en etapas iniciales de sucesión ecológica, aún no han alcanzado un tiempo suficiente para asemejarse, en términos de estructura y composición de especies leñosas, al sitio Conservado. Esto indica que el proceso de restauración sigue en marcha y requiere más tiempo para alcanzar condiciones similares a las de un bosque conservado. Sin embargo, los sitios Restaurados presentan una alta diversidad y representatividad de especies, lo cual es beneficioso para promover la estabilidad ecológica y la resiliencia del ecosistema.

Por otra parte, en los sitios Restaurados, el grupo funcional de las leguminosas está mejor representado que el de las no leguminosas en cuanto a número de especies, pero no en cuanto a abundancia de plantas. En los sitios Restaurados sobresalen por su alta sobrevivencia especies leguminosas como *Pithecellobium dulce*, *Mimosa benthamii* y *Lysiloma divaricatum* y no leguminosas como *Ipomoea pauciflora* y *Croton ciliatoglandulifer*, por lo que se recomiendan para futuros esfuerzos de restauración.

Luego de seis meses de lluvia, la mayoría de las propiedades del suelo no mostraron cambios, debido a que el tiempo transcurrido es muy corto para detectar diferencias. Sin embargo, la perturbación previa que sufrieron los suelos de los sitios Restaurados hace que muestren patrones heterogéneos en la recuperación de sus propiedades, debido a que el proceso de revegetación y adición de materia orgánica ha sido completamente antropogénico, por lo que se hacen necesarios enfoques personalizados para la restauración de cada uno de estos sitios, según las propiedades que se encuentran más rezagadas. No obstante, el sitio Restaurado que muestra los mejores avances en términos de la recuperación del suelo es ER-7.

Las concentraciones de Nt, Pt, Ct y el pH influyen en la estructura, composición y sobrevivencia de las plantas leñosas.

Consideraciones y Recomendaciones sobre los sitios Restaurados

Este estudio se realizó en sitios restaurados donde se emplearon diversas técnicas, como plantación, siembra al voleo y trasplante de vivero, sin seguir un diseño específico más allá de repoblar áreas abandonadas. Para futuros esfuerzos, se recomienda establecer niveles de intervención adecuados que garanticen el éxito del proyecto y evaluar periódicamente el impacto en las propiedades del suelo. Un manejo adaptativo y monitoreo a largo plazo son esenciales para asegurar el éxito de las especies establecidas y generar recomendaciones aplicables a esta cantera y otras con condiciones similares.

Con base en los resultados obtenidos, se proponen recomendaciones específicas para aumentar las probabilidades de éxito de la gestión realizada por la empresa, enfocándose principalmente en el manejo y mejoramiento del suelo. Dado que los ecosistemas intensamente perturbados, como los afectados por minería, tienen una capacidad limitada para regenerarse de forma natural, es fundamental priorizar el suelo como base para el establecimiento y crecimiento de las plantas. Estas acciones son clave para avanzar hacia la restauración completa del área y se fundamentan en las características observadas en los suelos de los sitios Restaurados.

1. Profundidad y Pedregosidad

Observaciones: ER-6, ER-5 y ER-3 presentan menor profundidad y mayor pedregosidad, posiblemente debido al arrastre del suelo por lluvia o riego.

Recomendaciones:

- Incrementar la cantidad de suelo depositado en ER-6, ER-5 y ER-3 para garantizar una profundidad uniforme y una menor pedregosidad.
- Mejorar el sistema de drenaje en estos sitios para evitar la pérdida de suelo. Se pueden construir canales de desvío de agua superficial.
- Utilizar ER-7, con baja pedregosidad y mayor profundidad, como referencia para establecer metas en otros sitios.

2. Densidad Aparente y Contenido Gravimétrico de Agua

Observaciones: La densidad aparente es mayor en los sitios Restaurados que en el Conservado. Aunque los valores actuales no limitan el crecimiento de las raíces y logran retener suficiente humedad, es deseable reducirla.

Recomendaciones:

- Continuar monitoreando este parámetro y aplicar prácticas que favorezcan la aireación del suelo, como el uso de materia orgánica y compost para mejorar la porosidad del suelo y la plantación de especies leguminosas que tienen raíces profundas y abren canales naturales en el suelo.
- Mejorar el sistema de drenaje en todos los sitios Restaurados para evitar la pérdida de suelo. Se pueden construir canales de desvío de agua superficial.

3. pH

Observaciones: Aunque los suelos no son ácidos (incluyendo el Conservado), tienden a ser demasiado alcalinos en los sitios restaurados. ER-3 destaca como el único sitio Restaurado con pH similar al Conservado tal vez debido a su reciente establecimiento.

Recomendaciones:

- Incorporar materia orgánica, como composta, para disminuir el pH en ER-7, ER-6 y ER-5.

4. Carbono Total (Ct) y Nitrógeno Total (Nt)

Observaciones: ER-7 tiene niveles de Ct similares al sitio conservado, gracias a una cobertura vegetal robusta. Sin embargo, el Nt es bajo en todos los sitios Restaurados, excepto ER-3.

Recomendaciones:

- Incrementar la presencia de especies leguminosas que mejoran el suelo, como *Pithecellobium dulce*, *Mimosa benthamii* y *Lysiloma divaricatum*, combinadas con otras especies como *Ipomoea pauciflora*, *Croton ciliatoglandulifer* y *Dodonaea viscosa* que también presentan un buen desempeño en todos los sitios.

5. Concentración de Nitrato (NO_3) y Amonio (NH_4)

Observaciones: Los niveles de nitrato y amonio se están lixiviando en los sitios ER-6, ER-5 y ER-3, mientras que en ER-7 están siendo utilizados por las plantas.

Recomendaciones:

- Mejorar la cobertura vegetal para minimizar la lixiviación principalmente con las especies leguminosas.
- Incrementar la cantidad de suelo depositado en ER-6, ER-5 y ER-3 para garantizar una profundidad uniforme y una menor pedregosidad.
- Mejorar el sistema de drenaje en estos sitios para evitar la pérdida de suelo. Se pueden construir canales de desvío de agua superficial.
- Utilizar ER-7, con baja pedregosidad y mayor profundidad, como referencia para establecer metas en otros sitios.

6. Relación C:N y NO_3^-:NH_4^+

Observaciones: Las relaciones son equilibradas, indicando que las prácticas actuales de manejo están bien encaminadas.

Recomendaciones:

- Continuar con el monitoreo y ajustes según sea necesario para mantener este equilibrio.

7. Fósforo Total (Pt) y Fósforo Disponible (Pa)

Observaciones: Los niveles de Pt son adecuados en todos los sitios Restaurados, mientras que el Pa es bajo, excepto en ER-3.

Recomendaciones:

- Reducir pH en ER-7, ER-6 y ER-5 para aumentar la disponibilidad de fósforo en el suelo para las plantas.

Conclusión General

ER-7 destaca como el sitio más avanzado en términos de restauración por lo que los esfuerzos deben centrarse en fortalecer las condiciones de ER-6, ER-5 y ER-3. No obstante, también se debe trabajar en ER-7, sobre todo con la plantación de especies vegetales. Estas recomendaciones buscan guiar a la empresa en la optimización de sus prácticas de manejo del suelo, fomentando una restauración ecológica exitosa y sostenible.

Anexos

Anexo 1: Censo de especies leñosas (marzo/2023).

Tabla 14. Abundancia de especies leñosas en el sitio Conservado clasificadas según la familia a la que pertenecen. Se muestran las especies compartidas con los sitios Restaurados (comunes, C) y las no comunes (NC) Datos obtenidos en temporada seca (marzo/2023).

Familias	Especies	No. Plantas	Compartidas
Arecaceae	*Brahea dulcis*	3	No
Asteraceae	*Eremosis corymbosa*	1	No
	Verbesina auriculata	19	Sí
Bignoniaceae	*Tecoma stants*	1	No
Celastraceae	*Pristimera celastroides*	1	No
Euphorbiaceae	*Croton ciliatoglandulifer*	11	Sí
Fabaceae	*Eysenhardthia polystachya*	1	Sí
	Haematoxylum brasiletto	7	No
	Leucaena leucocephala	1	No
	Lysiloma divaricatum	4	Sí
	Mimosa tricephala	2	Sí
	Senna holwayana	3	Sí
Lamiaceeae	*Salvia sessei*	4	No
Malpighiaceae	*Bunchosia canescens*	4	No
	Galphimia glauca	5	No
	Malpighia mexicana	5	No
Malvaceae	*Guazuma ulmifolia*	5	No
Picramniaceae	*Alvaradoa amorphoides*	2	No
Rhamnaceae	*Colubrina triflora*	3	No
Rutaceae	*Zanthoxylum fagara*	1	No
Sapindaceae	*Dodonaea viscosa*	14	Sí
Sapotaceae	*Sideroxylon capiri*	1	No
Ulmaceae	*Celtis caudata*	4	No
Verbenaceae	*Lippia origanoides*	1	No
16 familias	**24 especies**	**103**	**C:7 | NC:17**

Anexo 2. Resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) para el objetivo de Relación Planta-Suelo.

Los primeros dos ejes del ACP (Factor 1 y Factor 2) de las variables físicas del suelo en la estación seca no estuvieron correlacionados con la densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia de plantas leñosas después de un año, ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de plantas leñosas en la misma estación (**Tabla 15**).

Tabla 15. Correlaciones entre variables de la vegetación medidas en la temporada seca y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en cuatro variables físicas del suelo medidas en la misma temporada. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p).

Variables	Factor 1			Factor 2		
	r	r^2	p	r	r^2	p
Densidad de Plantas	0.15	0.02	0.6369	0.03	0.0007	0.9341
Densidad de Especies	0.44	0.19	0.1530	0.27	0.08	0.3994
Densidad de Leguminosas	0.43	0.18	0.1669	-0.43	0.18	0.1683
Densidad de No Leguminosas	-0.03	0.001	0.9229	0.25	0.06	0.4387
Sobrevivencia Mar23-Mar24	0.05	0.002	0.8854	0.23	0.05	0.4702
Ganancia en Altura	-0.34	0.12	0.2797	-0.08	0.006	0.8116
Ganancia en Diámetro Basal	0.24	0.06	0.4547	-0.15	0.02	0.6511

El Factor 1 del ACP de las variables químicas del suelo en la estación seca no estuvo correlacionado con la densidad de especies, la densidad de leguminosas, ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de las plantas leñosas en estación seca (**Tabla 16**). Sin embargo, sí estuvo correlacionado con la densidad de plantas leñosas, la densidad de no leguminosas y la sobrevivencia de plantas leñosas después de un año en la estación seca (**Tabla 16, Figura 9**).

El Factor 2 del ACP de las variables químicas del suelo en la estación seca no estuvo correlacionado con la densidad de plantas leñosas, la densidad de leguminosas y no leguminosas, la sobrevivencia de plantas leñosas después de un año ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de las plantas leñosas en estación seca. Sin embargo, sí estuvo correlacionado con la densidad de especies en la estación seca (**Tabla 16, Figura 10**).

Tabla 16. Correlaciones entre variables de la vegetación medidas en la temporada seca y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en ocho variables químicas del suelo medidas en la temporada seca. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p).

Variables	Factor 1			Factor 2		
	r	r^2	p	r	r^2	p
Densidad de Plantas	0.66	0.43	0.0197	0.34	0.11	0.2867
Densidad de Especies	0.13	0.02	0.6808	0.64	0.41	0.0239
Densidad de Leguminosas	0.36	0.13	0.2521	0.29	0.09	0.3544
Densidad de No Leguminosas	0.62	0.38	0.0329	0.26	0.07	0.4197
Sobrevivencia Mar23-Mar24	-0.69	0.48	0.0127	0.06	0.004	0.8486
Ganancia en Altura	0.08	0.007	0.7937	-0.18	0.03	0.5674
Ganancia en Diámetro Basal	-0.39	0.15	0.2123	0.32	0.10	0.3095

Los primeros dos ejes del ACP (Factor 1 y Factor 2) de las variables físicas del suelo en la estación de lluvia no estuvieron correlacionados con la densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia de plantas leñosas después de un año, ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de plantas leñosas en la misma estación (**Tabla 17**).

Tabla 17. Correlaciones entre variables de la vegetación medidas en la temporada de lluvias y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en cuatro variables físicas del suelo medidas en la temporada de lluvias. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p).

Variables	Factor 1			Factor 2		
	r	r^2	p	r	r^2	p
Densidad de Plantas	0.46	0.21	0.1348	-0.44	0.19	0.1576
Densidad de Especies	0.49	0.24	0.1084	-0.07	0.006	0.8173
Densidad de Leguminosas	0.41	0.17	0.1852	-0.15	0.02	0.6316
Densidad de No Leguminosas	0.25	0.06	0.4362	-0.39	0.15	0.2045
Sobrevivencia Mar23-Mar24	-0.13	0.02	0.6750	0.37	0.14	0.2347
Ganancia en Altura	-0.14	0.02	0.6580	-0.02	0.0004	0.9535
Ganancia en Diámetro Basal	0.17	0.03	0.5935	-0.03	0.0008	0.9298

El Factor 1 del ACP de las variables químicas del suelo en la estación de lluvia no estuvo correlacionado con la densidad de plantas leñosas, ni con la densidad de especies, ni con la densidad de leguminosas, ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de las plantas leñosas en estación de lluvia (**Tabla 18**). Sin embargo, sí estuvo correlacionado con la densidad de no leguminosas en estación de lluvia y la sobrevivencia de plantas leñosas después de un año en la estación de lluvia (**Tabla 18, Figura 11**).

Tabla 18. Correlaciones entre variables de la vegetación medidas en la temporada de lluvias y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en cuatro variables físicas del suelo medidas en la temporada de lluvias. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p).

Variables	Factor 1			Factor 2		
	r	r^2	p	r	r^2	p
Densidad de Plantas	-0.38	0.15	0.2174	-0.29	0.09	0.3526
Densidad de Especies	0.29	0.09	0.3544	-0.32	0.10	0.3151
Densidad de Leguminosas	0.35	0.13	0.2586	-0.53	0.28	0.0785
Densidad de No Leguminosas	-0.68	0.46	0.0154	0.02	0.0003	0.9599
Sobrevivencia Mar23-Mar24	0.78	0.61	0.0027	0.07	0.0048	0.8308
Ganancia en Altura	-0.29	0.08	0.3673	0.32	0.10	0.3081
Ganancia en Diámetro Basal	0.26	0.07	0.4175	-0.24	0.06	0.4563

El Factor 2 del ACP de las variables químicas del suelo en la estación de lluvia no estuvo correlacionado con la densidad de plantas leñosas, ni con la densidad de especies, ni con la densidad de leguminosas, ni con la densidad de no leguminosas, ni con la sobrevivencia después de un año, ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de las plantas leñosas en estación de lluvia (**Tabla 18**).

Los primeros dos ejes del ACP (Factor 1 y Factor 2) de las variables físicas del suelo en la estación seca no estuvieron correlacionado con la densidad de plantas leñosas, ni con la densidad de especies, ni con la densidad de leguminosas, ni con la densidad de no leguminosas, ni con la sobrevivencia después de un año, ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de las plantas leñosas en estación de lluvia (**Tabla 19**).

Tabla 19. Correlaciones entre variables de vegetación medidas en la temporada de lluvias y el Factor 1 o el Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en cuatro variables físicas del suelo medidas en la temporada seca. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p).

Variables	Factor 1			Factor 2		
	r	r^2	p	r	r^2	p
Densidad de Plantas	0.25	0.06	0.4391	0.16	0.03	0.6158
Densidad de Especies	0.41	0.17	0.1851	0.20	0.04	0.5242
Densidad de Leguminosas	0.46	0.22	0.1278	-0.12	0.01	0.7080
Densidad de No Leguminosas	-0.03	0.0009	0.9277	0.27	0.07	0.4027
Sobrevivencia Mar23-Mar24	0.05	0.002	0.8854	0.23	0.05	0.4702
Ganancia en Altura	-0.34	0.12	0.2797	-0.08	0.006	0.8116
Ganancia en Diámetro Basal	0.24	0.06	0.4547	-0.15	0.02	0.6511

El Factor 1 del ACP de las variables químicas del suelo en estación seca no estuvo correlacionado con la densidad de plantas leñosas, ni con la densidad de especies, ni con la densidad de leguminosas, ni con la densidad de no leguminosas, ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de las plantas leñosas en estación de lluvia (**Tabla 20**). Sin embargo, sí estuvo correlacionado con la sobrevivencia después de un año de las plantas leñosas (**Tabla 20, Figura 12**).

El Factor 2 del ACP de las variables químicas del suelo en estación seca no estuvo correlacionado con la densidad de plantas leñosas, ni con la densidad de leguminosas, ni con la densidad de no leguminosas, ni con la sobrevivencia después de un año, ni con la ganancia en altura o en diámetro basal de las plantas leñosas en estación de lluvia (**Tabla 20**). Sin embargo, sí estuvo correlacionado con la densidad de especies en estación de lluvia (**Tabla 20, Figura 13**).

Tabla 20. Correlaciones entre las variables de vegetación medidas en la temporada de lluvias y el Factor 1 o Factor 2 del análisis de componentes principales (ACP) basado en ocho variables químicas del suelo medidas en la temporada seca. Las variables de vegetación incluyen: densidad de plantas, densidad de especies, densidad de leguminosas, densidad de no leguminosas, sobrevivencia (marzo 2023 - marzo 2024), ganancia en altura y ganancia en diámetro basal. Se presentan los valores de correlación (r), coeficiente de determinación (r^2) y significancia (p).

Variables	Factor 1			Factor 2		
	r	r^2	p	r	r^2	p
Densidad de Plantas	0.41	0.17	0.1882	0.49	0.24	0.1029
Densidad de Especies	-0.09	0.008	0.7816	0.69	0.48	0.0130
Densidad de Leguminosas	-0.15	0.02	0.6329	0.44	0.20	0.1488
Densidad de No Leguminosas	0.57	0.33	0.0528	0.27	0.07	0.4005
Sobrevivencia Mar23-Mar24	-0.69	0.48	0.0127	0.06	0.0038	0.8486
Ganancia en Altura	0.08	0.007	0.7937	-0.18	0.03	0.5674
Ganancia en Diámetro Basal	-0.39	0.15	0.2123	0.32	0.10	0.3095

Referencias Bibliográficas

Abiala, M. A., Abdelrahman, M., Burritt, D. J., & Tran, L. S. P. (2018). Salt stress tolerance mechanisms and potential applications of legumes for sustainable reclamation of salt-degraded soils. *Land Degradation & Development, 29*(10), 3812-3822. https://doi.org/10.1002/ldr.3095

Adams, M. A., Simon, J., & Pfautsch, S. (2010). Woody legumes: A (re)view from the South. *Tree Physiology, 30*(9), 1072-1082. https://doi.org/10.1093/treephys/tpq061

Adams, M. A., Turnbull, T. L., Sprent, J. I., & Buchmann, N. (2016). Legumes are different: Leaf nitrogen, photosynthesis, and water use efficiency. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 113*(15), 4098-4103. https://doi.org/10.1073/pnas.1523936113

Adjei, E. O., Ayamba, B. E., Buri, M. M., Biney, N., & Appiah, K. (2023). Soil quality and fertility dynamics under a continuous cassava-maize rotation in the semi-deciduous forest agro-ecological zone of Ghana. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 7*, 1095207.

Alan, R. (1989). The effect of nitrogen nutrition on growth, chemical composition, and response of cucumber *Cucumis sativus* L. to nitrogen forms in solution culture. *Journal of Horticultural Science, 64*, 467–474. https://doi.org/10.1080/14620316.1989.11515979

Aronson, J., Clewell, A. F., Blignaut, J. N., & Milton, S. J. (2006). Ecological restoration: A new frontier for nature conservation and economics. *Journal for Nature Conservation, 14*(3-4), 135-139. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2006.05.005

Arranz-González, J. C. (2011). Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión. *Boletín Geológico y Minero, 122*, 171-180. ISSN: 0366-0176

Badano, E. I., Pérez, D., & Vergara, C. H. (2009). Love of nurse plants is not enough for restoring oak forests in a seasonally dry tropical environment. *Restoration Ecology, 17*(4), 571-576. https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2009.00530.x

Banda, K., Delgado-Salinas, A., Dexter, K. G., Linares-Palomino, R., Oliveira-Filho, A., Prado, D., et al. (2016). Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. Science. 353, 1383–1387. https://doi.org/10.1126/science.aaf5080

Barajas-Guzmán, M. G., Campo, J., & Barradas, V. L. (2006). Soil water, nutrient availability, and sapling survival under organic and polyethylene mulch in a seasonally dry tropical forest. *Plant and Soil, 287*, 347–357. https://doi.org/10.1007/s11104-006-9082-7

Barchuk, A. H., Campos, E. B., Oviedo, C., & Díaz, M. D. P. (2006). Supervivencia y crecimiento de plántulas de especies leñosas del Chaco Árido sometidas a remoción de la biomasa aérea. *Ecología Austral, 16*, 47-61. ISSN: 1667-782X

Batterman, S. A., Hedin, L. O., van Breugel, M., Ransijn, J., Craven, D. J., & Hall, J. S. (2013). Key role of symbiotic dinitrogen fixation in tropical forest secondary succession. *Nature, 502*(7470), 224-227. https://doi.org/ 10.1038/nature12525

Brady, N. C., & Weil, R. R. (1999). *The nature and properties of soils* (12th ed.). Prentice Hall. ISBN: 978-0-02-946030-6

Berlanga-Robles, C. A., Cervantes-Escobar, A., & Murúa-Figueroa, E. (2018). Estacionalidad y tendencias del bosque tropical caducifolio de la cuenca Piaxtla-Elota-Quelite y el área protegida Meseta de Cacaxtla, México. *Madera y Bosques, 24*(3). https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431576

Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana. (2009). *Croton ciliatoglandulifer*. Recuperado de http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/apmtm/termino.php?l=3&t=croton-ciliatoglandulifer

Bonan, G. B., & Fagundes, M. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science, 320*(5882), 1444–1449. https://doi.org/ 10.1126/science.1155121

Bonfil, C., Contreras-Rodríguez, V., & Barrales-Alcalá, B. (2022). El papel de las plantaciones y la regeneración natural en la recuperación inicial de la cobertura vegetal en una cantera en Morelos, México. *Acta Botánica Mexicana, 129*, e1965. https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1965

Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-Total. In *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods* (pp. 1085-1121). Soil Science Society of America.

Campillo, N., Martín, F., Simón, M., & Iriarte, A. (2000). Cuantificación de la degradación de las propiedades de los suelos en explotaciones mineras a cielo abierto. *Edafología, 7*(3), 31-42.

Campo, J., & Vázquez-Yañes, C. (2004). Effects of nutrient limitation on aboveground carbon dynamics during tropical dry forest regeneration in Yucatán, Mexico. *Ecosystems, 7*, 311–319. https://doi.org/10.1007/s10021-003-0249-2

Campo-Alves, J. (2003). Disponibilidad y flujos de nutrimentos en una toposecuencia con bosque tropical seco en México. *Agrociencia, 37*(2), 211-219.

Canadell, J., & Zedler, P. H. (1995). Underground structures of woody plants in Mediterranean ecosystems of Australia, California, and Chile. In *Ecology and biogeography of Mediterranean ecosystems in Chile, California, and Australia* (pp. 177-210). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2490-7_8

Carrasco-Carballido, V. (2019). *Evaluación de la sucesión natural y la recuperación de la función del ecosistema en la Selva Baja Caducifolia* (Tesis de Doctorado). Facultad de Ciencias Biológicas, UAEM, Morelos, México. http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2433

Carrasco-Carballido, V., Martínez-Garza, C., Jiménez-Hernández, H., Márquez-Torres, F., & Campo, J. (2019). Effects of initial soil properties on three-year performance of six tree species in tropical dry forest restoration plantings. *Forests, 10*(5), 428. https://doi.org/10.3390/f10050428

Carter, M. R., & Rennie, D. A. (1982). Changes in soil quality under zero tillage farming systems: Distribution of microbial biomass and mineralizable C and N potentials. *Canadian Journal of Soil Science, 62*(4), 587-597. https://doi.org/10.4141/cjss82-066

CATIE. (1999). *Nota Técnica sobre Manejo de Semillas Forestales. Pithecellobium dulce* (No. 63). Costa Rica.

Ceccon, E., Huante, P., & Campo, J. (2003). Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the survival and recruitment of seedlings of dominant tree species in two abandoned tropical dry forests in Yucatán, Mexico. *Forest Ecology and Management, 182*(1–3), 387–402. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00085-9

Ceccon, E., Huante, P., & Rincón, E. (2006). Abiotic factors influencing tropical dry forest regeneration. *Brazilian Archives of Biology and Technology, 49*(3), 305-312. https://doi.org/10.1590/S1516-89132006000300016

Ceccon, E. (2011). Los bosques tropicales estacionalmente secos: ¿una prueba ácida para la restauración? En *La Restauración Ecológica en la Práctica. Memorias en extenso del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica y II Simposio Nacional de Experiencias en Restauración* (pp. 119-130). Universidad Nacional de Colombia.

Ceccon, E., & Martínez-Garza, C. (2016). *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas*. UAEM-CRIM-UAEM-CONABIO, México.

Cemosa. (2015). *Manifestación de impacto ambiental. Estudio Técnico Justificativo (2010): Ampliación de la cantera de roca caliza de la planta de cemento Tepetzingo. Condicionante 5.*

Cervantes, V., Arriaga, V., Meave, J., & Carabias, J. (1998). Growth analysis of nine multipurpose woody legumes native from southern Mexico. *Forest Ecology and Management, 110*, 329-341. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00298-9

Chacon, N., & Dezzeo, N. (2004). Phosphorus fractions and sorption processes in soil samples taken in a forest-savanna sequence of the Gran Sabana in Southern Venezuela. *Biology and Fertility of Soils, 40*, 14-19. https://doi.org/10.1007/s00374-004-0733-7

Chapin, F. S., Matson, P. A., & Vitousek, P. M. (2011). *Principles of terrestrial ecosystem ecology*. Springer-Verlag.

Chazdon, R. L. (2014). *Second Growth: The Promise of Tropical Forest Regeneration in an Age of Deforestation*. University of Chicago Press.

Clemmensen, K. E., Bahr, A., Ovaskainen, O., Dahlberg, A., Ekblad, A., Wallander, H., ... & Lindahl, B. (2013). Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science, 339*(6127), 1615-1618. https://doi.org/10.1126/science.1231923

Colwell, R. K. (2009). Biodiversity: Concepts, patterns, and measurement. In *The Princeton Guide to Ecology* (pp. 257-263). Princeton University Press. https://doi.org/10.1515/9781400833023.257

CONABIO. (2022). *Selvas secas*. Recuperado el 17 de enero de 2025. https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/selvaSeca?utm_source=ch

Connell, J. H., & Slatyer, R. O. (1977). Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *The American Naturalist, 111*(982), 1119-1144. https://doi.org/10.1086/283241

Contreras-Rodríguez, V. (2022). *Revegetación de la cantera de Cementos Moctezuma en Tepetzingo, Morelos: Contribución relativa de las plantaciones y la regeneración natural* (Tesis de maestría). Facultad de Ciencias, UNAM, México.

Corlett, R. T. (2016). Restoration, reintroduction, and rewilding in a changing world. *Trends in Ecology & Evolution, 31*(6), 453-462. https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.017

Costantini, E. A. C., Branquinho, C., Nunes, A., Schwilch, G., Stavi, I., Valdecantos, A., & Zucca, C. (2016). Soil indicators to assess the effectiveness of restoration strategies in dryland ecosystems. *Solid Earth, 7*, 397-414. https://doi.org/10.5194/se-7-397-2016

Cross, A. F., & Schlesinger, W. H. (1995). A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma, 64*, 197–214. https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00023-4

Curtin, D., Campbell, C. A., & Jalil, A. (1998). Effects of acidity on mineralization: pH-dependence of organic matter mineralization in weakly acidic soils. *Soil Biology and Biochemistry, 30*(1), 57-64. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00094-1

da Silva, T. G., de Queiroz, M. G., Zolnier, S., de Souza, L. S., de Souza, C. A., de Moura, M. S., & Alves, H. K. (2021). Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area. *Soil and Tillage Research, 207*, 104852. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104852

Davidson, E. A., & Swank, W. T. (1986). Environmental parameters regulating gaseous nitrogen losses from two forested ecosystems via nitrification and denitrification. *Applied and Environmental Microbiology, 52*(6), 1287-1292. https://doi.org/10.1128/AEM.52.6.1287-1292.1986

Davidson, E. A., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Riley, R., Dunkin, K., Garcia-Mendez, G., & Maass, J. M. (1993). Processes regulating soil emissions of NO and N_2O in a seasonally dry tropical forest. *Ecology, 74*(1), 130-139. https://doi.org/10.2307/1939508

De la Garza Garza, Ó. J., & Arteaga García, J. C. (2011). Análisis de la competencia en la industria cementera en México. *EconoQuantum, 8*(1-2), 73-89. ISSN: 1870-6622

Delhaize, E., & Ryan, P. R. (1995). Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology, 107*(2), 315-321. https://doi.org/10.1104/pp.107.2.315

Dieter, D., Elsenbeer, H., & Turner, B. (2010). Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in Central Panama. *Catena, 82*, 118–125. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.05.010

Dirzo, R., Young, H. S., Mooney, H., & Ceballos, G. (2011). Introduction. In *Seasonally Dry Tropical Forest: Ecology and Conservation* (pp. xi-xiii). Island Press.

Domínguez-Gómez, T. G., Hernández-González, B. N., González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Alanís-Rodríguez, E., & Alvarado, M. S. (2018). Estructura y composición de la vegetación en cuatro sitios de la Sierra Madre Occidental. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9*(50), 9-34. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.227

Effects of land-use change on some properties of tropical soils – an example from Southeast Mexico. (2011). *Geoderma, 151*, 87–97. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.011

Elser, J. J., Bracken, M. E. S., Cleland, E., Gruner, D. S., Harpole, W. S., Hillebrand, H., Ngai, J. T., Seabloom, E. W., Shurin, J. B., & Smith, J. S. (2007). Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters, 10*(12), 1135–1142. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x

Finegan, B. (1984). Forest succession. *Nature, 312*, 109-114. https://doi.org/10.1038/312109a0

Fisher, R. F., & Binkley, D. (2000). *Ecology and Management of Forest Soils*. Wiley. ISBN: 978-1-119-45565-3

Fornara, D. A., & Tilman, D. (2008). Plant functional composition influences rates of soil carbon and nitrogen accumulation. *Journal of Ecology, 96*(2), 314-322. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01345.x

Frantz, T. A., Peterson, D. M., & Durbin, R. D. (1982). Sources of ammonium in oat leaves treated with tabtoxin or methionine sulfoximine. *Plant Physiology, 69*, 345–348. https://doi.org/10.1104/pp.69.2.345

Fredericksen, T. S., Justiniano, M. J., Mostacedo, B., Kennard, D., & McDonald, L. (2000). Comparative regeneration ecology of three leguminous timber species in a Bolivian tropical dry forest. *New Forests, 20*(1), 45-64. https://doi.org/10.1023/A:1006735819449

Fuentes-Hernández, A., Mendoza-Orozco, M., Ríos-Casanova, L., Soler-Aburto, A., Muñuz-Iniestra, D., & Godínez-Álvarez, H. (2019). Impact of agriculture and cattle raising on the tropical dry forest of Zirándaro Guerrero: An evaluation using ecological indicators. *Botanical Sciences, 97*(2), 148-154. https://doi.org/10.17129/botsci.2043.

Galán, B. I. V., & Corrales, S. C. (2021). ¿Desindustrialización prematura? El caso de Nuevo León, México. *Paradigma económico, 13*(2), 29-54. https://doi.org/10.36677/paradigmaeconomico.v13i2.16051

Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration (Second edition). *Restoration Ecology, 27*(S1), S1-S46. https://doi.org/10.1111/rec.13035

García-Oliva, F., Gallardo-Lancho, J. F., Montaño, N. M., & Islas, P. (2006). Soil carbon and nitrogen dynamics followed by a forest-to-pasture conversion in western Mexico. *Agroforestry Systems, 66*, 93-100. https://doi.org/10.1007/s10457-005-2917-z

Gashaw, L., & Mugwira, L. M. (1981). Ammonium N and nitrate N effects on the growth of and mineral composition of triticale, wheat and rye. *Agronomy Journal, 73*, 47–51. https://doi.org/10.2134/agronj1981.00021962007300010011x

Gastauer, M., Reis-Silva, J., Fróis-Caldeira-Junior, C., Junio-Ramos, S., Souza-Filho, P. W. M., Furtini-Neto, A. E., & Siquiera, J. O. (2018). Mine land rehabilitation: Modern ecological approaches for more sustainable mining. *Journal of Cleaner Production, 172*, 1409-1422. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.223

Gei, M. G., Rozendaal, D. M. A., Poorter, L., et al. (2018). Legume abundance along successional and rainfall gradients in Neotropical forests. *Nature Ecology & Evolution, 2*, 1104–1111. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0559-6

Geissen, V., Sanchez-Hernandez, R., Kampichler, C., Ramos-Reyes, R., Sepulveda-Lozada, A., Ochoa-Goana, S., de Jong, B. H. J., Huerta-Lwanga, E., Hernandez-Daumas, S. (2009). Effects of land-use change on some properties of tropical soils—an example from Southeast Mexico. *Geoderma*, *151*(3-4), 87-97. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.011

Gerhardt, K. (1996). Effects of root competition and canopy openness on survival and growth of tree seedlings in a tropical seasonal dry forest. *Forest Ecology and Management, 82*(1-3), 33-48. https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03700-4

Givan, C. V. (1979). Metabolic detoxification of ammonia in tissues of higher plants. *Phytochemistry, 18*, 375–382. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)81870-1

Gobierno del Estado de Morelos, & CEAMA. (2008). *Plan de Manejo de la Reserva Estatal Sierra Monte Negro*. Gobierno del Estado de Morelos y Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente, Morelos, México.

González-Chévez, L., & Flores-Díaz, E. (2020). *Diagnóstico participativo comunitario. Tepetzingo, Morelos*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ciencias Sociales y Estudios Regionales, Morelos, México. https://riaa.uaem.mx/xmlui/bitstream/handle/20.500.12055/1351/diagnostico-tepetzingo.pdf?sequence=1

González, O. J., & Zak, D. R. (1996). Tropical dry forests of St. Lucia, West Indies: Vegetation and soil properties. *Biotropica*, 28, 618–626. https://doi.org/10.2307/2389048

Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C., & Ellert, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science, 74*(4), 367-385. https://doi.org/10.4141/cjss94-051

Groppo, J. D., Lins, S. R. M., Camargo, P. B., Assad, E. D., Pinto, H. S., Martins, S. C., Salgado, P. R., Evangelista, B., Vasconcellos, E., Sano, E. E., Pavao, E., Luna, R., & Martinelli, L. A. (2015). Changes in soil carbon, nitrogen and phosphorus due to land-use changes in Brazil. *Biogeosciences, 12*, 2533–2571. https://doi.org/10.5194/bg-12-4765-2015

Guariguata, M., & Ostertag, R. (2001). Neotropical secondary forest succession: Changes in structural and functional characteristics. *Forest Ecology and Management, 148*, 185-206. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00535-1

Guo, S., Brtick, H., & Sattelmacher, B. (2002). Effects of supplied nitrogen form on growth and water uptake of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants. *Plant and Soil, 239*, 267–275. https://doi.org/10.1023/A:1015014417018

Hector, A., Hautier, Y., Saner, P., Wacker, L., Bagchi, R., Joshi, J., & Loreau, M. (2010). General stabilizing effects of plant diversity on grassland productivity through population asynchrony and overyielding. *Ecology, 91*(8), 2213-2220. https://doi.org/10.1890/09-1162.1

Hillel, D. (2003). *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier.

Hobbs, R. J., & Harris, J. A. (2001). Restoration ecology: Repairing the earth's ecosystems in the new millennium. *Restoration Ecology, 9*(2), 239-246. https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2001.009002239.x

Holl, K. D. (1999). Factors limiting tropical rain forest regeneration in abandoned pasture: Seed rain, seed germination, microclimate, and soil. *Biotropica, 31*, 229-242. https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.1999.tb00135.x

Holl, K. D., & Aide, T. M. (2011). When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management, 261*(10), 1558-1563. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.07.004

Howe, H., & Martínez-Garza, C. (2014). Restoration as experiment. *Botanical Sciences, 92*, 459-468. ISSN 2007-4298

INaturalistMX. (2024). *Ipomoea arborescens*. Retrieved July 19, 2024, from https://mexico.inaturalist.org/taxa/281597-Ipomoea-arborescens

INaturalistMX. (2024). *Ipomoea pauciflora*. Retrieved July 19, 2024, from https://mexico.inaturalist.org/taxa/281779-Ipomoea-pauciflora

Ingestad, T. (1973). Mineral nutrient requirements of cucumber seedlings. *Plant Physiology, 52*, 332–338. https://doi.org/10.1104/pp.52.4.332

Inomura, K., Bragg, J., Riemann, L., & Follows, M. J. (2018). A quantitative model of nitrogen fixation in the presence of ammonium. *PLOS One, 13*(11), e0208282. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208282

Jara, P., Martínez, E., & Campo, J. (2009). N and P dynamics in the litter layer and soil of Mexican semi-arid forests, state of Morelos. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *130*(3-4), 164-170. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.01.002

Jaramillo, V. J., & Sanford, R. L. (1995). Nutrient cycling in tropical deciduous forests. In S. H. Bullock, H. A., & E. Medina (Eds.), *Seasonally dry tropical forests* (pp. 346-361). Cambridge University Press.

Jaramillo, V., Kauffman, J., Rentería-Rodríguez, L., Cummings, D., & Ellingson, L. (2003). Biomass, Carbon, and Nitrogen Pools in Mexican Tropical Dry Forest Landscapes. *Ecosystems*, *6*, 609-629. https://doi.org/10.1007/s10021-002-0195-4

Jiménez, C., Huante, P., & Rincon, E. (2006). Restauración de minas superficiales en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F, México. 83 pp.

Jiménez-Hernández, M. (2021). Restauración de la selva estacional de Morelos: Efectos en el suelo a corto plazo (Tesis de Maestría). Facultad de Ciencias Biológicas, UAEM, Morelos, México. http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/1953

Johnson, C. D., & Skousen, J. G. (1995). Minesoil properties of 15 abandoned mine land sites in West Virginia. *Journal of Environmental Quality*, *24*, 635-643. https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400040014x

Johnson, N. C., & Wedin, D. A. (1997). Soil carbon, nutrients, and mycorrhizae during conversion of dry tropical forest to grassland. *Ecological Applications*, *7*(1), 171-182. https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0171:SCNAMD]2.0.CO;2

Jones, D. L., Healey, J. R., Willett, V. B., Farrar, J. F., & Hodge, A. (2005). Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway? *Soil Biology and Biochemistry*, 37(3), 413-423. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.008

Jorba, M., & Vallejo, V. R. (Eds.). (2010). *Manual para la restauración de canteras de roca caliza en clima mediterráneo*. Generalitat de Catalunya. Barcelona, España. 107 pp.

Keeney, D. R., & Nelson, D. W. (1982). Nitrogen-inorganic forms. In *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (pp. 643-698). American Society of Agronomy.

Khurana, E., & Singh, J. S. (2001). Ecology of seed and seedling growth for conservation and restoration of tropical dry forest: A review. *Environmental Conservation, 28*(1), 39–52. https://doi.org/10.1017/S0376892901000042

Kotsiras, A., Olympios, C. M., Drosopoulos, J., & Passam, H. C. (2002). Effect of nitrogen form and concentration on the distribution of ions within cucumber fruit. *Journal of American Science of Horticulture*, *95*, 175-183. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00042-0

Kumar, C. M., & Ghoshal, N. G. (2017). Variation in soil physico-chemical properties in dry tropics: Effect of land-use change.

Lal, R. (2005). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, *220*(1-3), 242-258. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015

Lamb, D., Erskine, P. D., & Parrotta, J. A. (2005). Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, *310*, 1628-1632. https://doi.org/10.1126/science.1111773

Lebrija-Trejos, E., Pérez-García, E. A., Meave, J. A., Bongers, F., & Poorter, L. (2010). Functional traits and environmental filtering drive community assembly in a species-rich tropical system. *Ecology*, *91*, 386-398. https://doi.org/10.1890/08-1449.1

Leirana-Alcocer, J. L., Hernández-Betancourt, S., Salinas-Peba, L., & Guerrero-González, L. (2009). Cambios en la estructura y composición de la vegetación relacionados con los años de abandono de tierras agropecuarias en la selva baja caducifolia espinosa de la reserva de Dzilam, Yucatán. *Polibotánica*, *(27)*, 53-70. ISSN 1405-2768

Leirós de la Peña, M. C., Varela Martínez, C., Gil Sotrés, F., Trasar Cepeda, M. S., & Seoane Labandeira, S. (1995). Los suelos de la mina. In F. Guitián Ojea (Ed.), *Recuperación de las escombreras de la Mina de Lignitos de Meirama (A Coruña)* (pp. 125-158). Universidad de Santiago de Compostela-Lignitos de Meirama.

Limstrom, G. A. (1960). Forestation of strip mined land in the central states. *Agriculture Handbook No. 166*. USDA. U.S. Government Printing Office.

Lohbeck, M., Poorter, L., Lebrija-Trejos, E., Martínez-Ramos, M., Meave, J. A., Paz, H., & Bongers, F. (2013). Successional changes in functional composition contrast for dry and wet tropical forest. *Ecology*, *94*(6), 1211-1216. https://doi.org/10.1890/12-1850.1

Lott, E. J., & Atkinson, T. H. (2010). Diversidad florística. In G. Ceballos, L. Martínez, A. Garcia, J. Bezaury, & R. Dirzo (Eds.), *Diversidad, amenazas y áreas prioritarias para la conservación de las Selvas Secas del Pacífico de México* (pp. 66-76). CONABIO

Louman, B., Quiroz, D., & Nilson, M. (2001). *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. Serie Técnica, Manual Técnico Núm. 46. CATIE.

Maldonado-Almanza, B. J. (1997). *Aprovechamiento de los recursos florísticos de la Sierra de Huautla, Morelos, México* (Tesis de maestría). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

Maranguit, D., Guillaume, T., & Kuzyakov, Y. (2017). Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Catena, 149*, 385-393. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.10.010

Márquez-Torres, J. F. (2016). Herbivoría y crecimiento en seis especies arbóreas de la selva estacional, establecidas en plantaciones de restauración ecológica (Maestría). Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Márquez-Torres, J. F. (2022). *Restauración de servicios ecosistémicos con plantaciones mixtas* (Tesis doctoral, Doctorado en Ciencias Naturales). Universidad Autónoma del Estado de Morelos. http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/2987

Marschner, P. (2012). Rhizosphere biology. In *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (pp. 369-388). Academic Press.

Martínez-Garza, C., Bongers, F., & Poorter, L. (2013). Are functional traits good predictors of species performance in restoration plantings in tropical abandoned pastures? *Forest Ecology and Management, 303*, 35-45. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.046

Martínez-Garza, C., Osorio-Beristain, M., Alcalá, R., Valenzuela, D., & Mariano, N. (2016). Ocho años de restauración experimental en las selvas estacionales de México. En C. Martínez-Garza & E. Ceccon (Eds.), *Experiencias mexicanas en la restauración de los ecosistemas* (pp. 385-406). UAEM.

Martínez-Garza, C., Peña, V., Ricker, M., Campos, A., & Howe, H. F. (2005). Restoring tropical biodiversity: Leaf traits predict growth and survival of late-successional trees in early-successional environments. *Forest Ecology and Management, 217*(2-3), 365-379. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.07.001

Martínez-Sias, V. A., Martínez-Hernández, J. D. J., Zúñiga-Estrada, L., & Martínez-Montoya, J. F. (2022). Mejoradores de suelo salino-sódico y su efecto en el desarrollo de jitomate (*Solanum lycopersicum*). *Ecosistemas y recursos agropecuarios, 9*(1). https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3086

Martínez-Yrízar, A. (1995). Biomass distribution and primary productivity of tropical dry forests. En S. Bullock, H. A. Mooney, & E. Medina (Eds.), *Seasonally dry tropical forests* (pp. 326-345). Cambridge University Press.

Massad, T. J. (2012). Interactions in tropical reforestation—how plant defense and polycultures can reduce growth-limiting herbivory. *Applied Vegetation Science, 15*(3), 338-348. https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2012.01185.x

Matsumoto, H., & Tamura, K. (1981). Respiratory stress in cucumber roots treated with ammonium or nitrate nitrogen. *Plant and Soil, 60*, 195-204. https://doi.org/10.1007/BF02374104

Mengel, K., & Kirkby, E.A. (1987). *Principles of Plant Nutrition* (4th ed.). International Potash Institute.

Mesa-Sierra, N., de la Peña-Domene, M., Campo, J., & Giardina, C. P. (2025). Restoration of tropical dry forest: an analysis of constraints and successes across a highly threatened biome. *Frontiers in Environmental Science*, *12*, 1458613.

Miles, L., Newton, A. C., Defries, R. S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V., & Gordon, J. E. (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography, 33*(3), 491-505. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x

Miranda, F., & Hernández, E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica de México, 28*, 29-179.

Moges, A., Dagnachew, M., & Yimer, F. (2013). Land use effects on soil quality indicators: A case study of Abo-Wonsho, Southern Ethiopia. *Applied Environmental Soil Science*, 1–9. https://doi.org/10.1155/2013/784989

Montagnini, F., González, E., Porras, C., & Rheingans, R. (1995). Mixed and pure forest plantations in the humid neotropics: A comparison of early growth, pest damage, and establishment costs. *The Commonwealth Forestry Review, 74*(4), 306-314. https://www.jstor.org/stable/42608324

Morales-Romero, D., Campo, J., Godinez-Alvarez, H., & Molina-Freaner, F. (2015). Soil carbon, nitrogen, and phosphorus changes from conversion of thornscrub to buffelgrass pasture in northwestern Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 199*, 231-237. https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.09.015

Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta, 27*, 31-36.

Muscarella, R., Uriarte, M., Erickson, D. L., Swenson, N. G., Zimmerman, J. K., & Kress, W. J. (2017). Variation of tropical forest assembly mechanisms across regional environmental gradients. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 24*, 98-106. https://doi.org/10.1016/j.ppees.2016.09.007

Neina, D. (2019). The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation. *Applied and Environmental Soil Science, 2019*, 5794869. https://doi.org/10.1155/2019/5794869

Norisada, M., & Kojima, K. (2005). Nitrogen form preference of six dipterocarp species. *Forest Ecology and Management, 216*, 175–186. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.020

O'Halloran, I. P., Miller, M. H., & Arnold, G. (1986). Absorption of P by corn (*Zea mays* L.) as influenced by soil disturbance. *Canadian Journal of Soil Science, 66*(2), 287-302. https://doi.org/10.4141/cjss86-030

OECD-Organization for Economic Co-operation and Development. (2003). *Soil organic carbon and agriculture: Developing indicators for policy analyses*. Proceedings of an OECD expert meeting (Scott Smith, C.A., Ed.). Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa and Organization for Economic Co-Operation and Development.

Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (pp. 403-430). American Society of Agronomy.

Parkes, D., Newell, G., & Cheal, D. (2003). Assessing the quality of native vegetation: The 'habitat hectares' approach. *Ecological Management & Restoration, 4*(1), S29-S38. https://doi.org/10.1046/j.1442-8903.4.s.4.x

Parrotta, J. A., & Knowles, O. H. (1999). Restoration of tropical moist forests on bauxite-mined lands in the Brazilian Amazon. *Restoration Ecology, 7*(2), 103-116. https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1999.72001.x

Paul, E. A. (2014). Soil microbiology, ecology, and biochemistry: An exciting present and great future built on basic knowledge and unifying concepts. *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*, 1-13.

Paul, K., Polglase, P., Nyakuengama, J., & Khanna, P. (2002). Change in soil carbon following afforestation. *Ecological Management, 168*(2), 241-257. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00740-X

Peña-Domene, M. D. L., Ayestarán Hernández, L. M., Márquez Torres, J. F., Martínez Monroy, F., Rivas Alonso, E., Carrasco Carballido, P. V., ... & Martínez-Garza, C. (2022). Sistemas silvopastoriles enriquecidos: Una propuesta para integrar la conservación en la producción ganadera en comunidades rurales de Los Tuxtlas, México. *Acta Botánica Mexicana, 129*, 1-16. https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1925

Peña-Ramírez, V. M. (2013). *Dinámica de la calidad de sitio a través de una cronosecuencia volcánica y sus implicaciones para la productividad forestal* (Tesis de Doctorado). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Pilbeam, D. J., & Kirkby, E. A. (1992). Nitrate and ammonium utilization by plants. En K. Mengel & D. J. Pilbeam (Eds.), *Nitrogen metabolism of plants* (pp. 54-70). Oxford Science Publications.

Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R. (1995). Environmental and economic costs of soil erosion and conservation. *Science, 267*(5201), 1117–1123. https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117

Plants of the World Online. (n.d.). Retrieved July 19, 2024, from https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:490737-1

Poorter, L., de Plassche, M. V., Willems, S., & Boot, R. G. A. (2004). Leaf traits and herbivory rates of tropical tree species differing in successional status. *Plant Biology, 6*(6), 746-754. https://doi.org/10.1055/s-2004-821269

Poorter, L., van der Sande, M. T., Thompson, J., Arets, E. J., Alarcón, A., Álvarez-Sánchez, J., ... & Sterck, F. J. (2016). Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography, 25*(3), 286-296. https://doi.org/10.1111/geb.12364

Portillo-Quintero, C., Sanchez-Azofeifa, A., Calvo-Alvarado, J., Quesada, M., and do Espirito Santo, M. M. (2015). The role of tropical dry forests for biodiversity, carbon and water conservation in the neotropics: lessons learned and opportunities for its sustainable management. Reg. Environ. Change 15, 1039–1049. https://doi.org/10.1007/s10113-014-0689-6

Powers, J. S., & Tiffin, P. (2010). Plant functional type classifications in tropical dry forests in Costa Rica: Leaf habit versus taxonomic approaches. *Functional Ecology, 24*(4), 927-936. https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2010.01701.x

Ratanapongsai, Y. (2020). Seedling recruitment of native tree species in active restoration forest. *Forest and Society, 4*(1), 243-255. https://doi.org/10.24259/fs.v4i1.9421

Reid, J. L., Fagan, M. E., & Zahawi, R. A. (2018). Positive site selection bias in meta-analyses comparing natural regeneration to active restoration. *Science Advances, 4*(5), eaas9143. https://doi.org/10.1126/sciadv.aas9143

Rojas-Robles, G. A. (2023). *Evaluación de las propiedades del mantillo en plantaciones de restauración ecológica en la selva estacional* (Tesis de Maestría). Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México. http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/4245

Romualdo-Romualdo, R. (2003). *El fósforo en el suelo es el nutriente más limitante* (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Autónoma Nacional de México, Ciudad de México, México. https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000601300

Rundel, P. W., Mooney, H. A., Winner, W. E., & Pell, E. J. (1991). Arbusto life forms. In *Responses of plants to multiple stresses* (pp. 345-370). Academic Press.

Rusch, G., Pausas, J., & Lepš, J. (2003). Plant functional types in relation to disturbance and land use. *Journal of Vegetation Science, 14*(3), 305-322. https://doi.org/10.1658/1100-9233(2003)014[0307:PFTIRT]2.0.CO;2

Rzedowski, J. (1978). Bosque tropical caducifolio. In *Vegetación de México* (pp. 189-203). Limusa. https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMxPort.pdf

Sanchez, P. A. (1976). *Properties and management of soils in the tropics*. John Wiley & Sons.

Saucedo-Morquecho, E. (2016). Desempeño y atributos funcionales de árboles en plantaciones de restauración ecológica en el bosque tropical caducifolio de Chamela, Jalisco. (Tesis de Maestría). Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Saynes, V., Hidalgo, C., Etchevers, J. D., & Campo, J. E. (2005). Soil C and N dynamics in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Applied Soil Ecology, 29*(3), 282-289. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.11.007

Schroth, G., & Sinclair, F. L. (Eds.). (2003). *Trees, crops, and soil fertility: Concepts and research methods*. Cabi.

SER. (2013). Society for Ecological Restoration International. Science and Policy Working Group. Retrieved from www.ser.org

Siebe, C., Jahn, R., & Stahr, K. (2006). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo* (2nd ed.). Instituto de Geología-UNAM.

Singh, J. S., and Chaturvedi, R. K. (2017). Tropical dry deciduous forest: research trends and emerging features. Springer

Singh, A. K., Rai, A., Banyal, R., Singh, P., & Singh, N. (2018). Plant community regulates soil multifunctionality in a tropical dry forest. *Ecological Indicators, 95*, 953-963. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.030

Smith, P., House, J. I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., ... & Pugh, T. A. M. (2015). Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 22(3), 1008-1028. https://doi: 10.1111/gcb.13068

Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). Ecología. (6.a ed.). Madrid, España. Pearson. Educación, S. A. 776 pp.

Smith-Martin, C. M., Gei, M. G., Bergstrom, E., Becklund, K. K., Becknell, J. M., Waring, B. G., ... & Powers, J. S. (2017). Effects of soil type and light on height growth, biomass partitioning, and nitrogen dynamics on 22 species of tropical dry forest tree seedlings: Comparisons between legumes and nonlegumes. *American Journal of Botany, 104*(3), 399-410. https://doi.org/10.3732/ajb.1600276

Sollins, P., Homann, P., & Caldwell, B. A. (1996). Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. *Geoderma, 74*, 65-105. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(96)00036-5

Sonneveld, C. (2002). Composition of nutrient solutions. In D. Savvas & H. C. Passam (Eds.), *Hydroponic production of vegetables and ornamentals* (pp. 179-210). Embryo Publications.

Spohn, M., Ermak, A., & Kuzyakov, Y. (2013). Microbial gross organic phosphorus mineralization can be stimulated by root exudates – a 33P isotopic dilution study. *Soil Biology and Biochemistry, 65*, 254-263. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.05.028

Stevenson, F. J., & Cole, M. A. (1999). *Cycles of soil*. John Wiley & Sons.

Syers, J. K., Johnston, A. E., & Curtin, D. (2008). Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 18*(108), 5-50.

Tabatabaei, S. J., Yusefi, M., & Hajiloo, J. (2008). Effects of shading and NO3:NH4 ratio on the yield, quality, and N metabolism in strawberry. *Scientia Horticulturae, 116*(3), 264-272. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.12.008

Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant physiology* (5th ed.). Sinauer Associates Inc.

Tetreault, D. V. (2013). La megaminería en México: Reformas estructurales y resistencia. *Letras Verdes, 14*, 214-234. ISSN 1390-4280

Thakur, T. K., Patel, D. K., Thakur, A., Kumar, A., Bijalwan, A., Bhat, J. A., et al. (2021). Biomass production assessment in a protected area of dry tropical forest ecosystem of India: a field to satellite observation approach. Front. Environ. Sci. 9,757976. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.757976

Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods* (pp. 475-490). Soil Science Society of America.

Tilman, D. 1987. Secondary succession and the pattern of plant dominance along experimental nitrogen gradients. Ecological Monographs 57:189–214

Tilman, D., Reich, P. B., & Knops, J. M. (2006). Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment. *Nature, 441*(7093), 629-632. https://doi.org/10.1038/nature04742

Tiwari, S., Singh, C., Boudh, S., Rai, P., Gupta, V. K., & Singh, J. S. (2019). Land use change: A key ecological disturbance declines soil microbial biomass in dry tropical uplands. *Journal of Environmental Management, 242*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.052

Tormo-Blanes, J. (2007). Factores que influyen en la colonización vegetal y la revegetación de taludes de carretera en ambiente mediterráneo (Tesis de Doctorado). Centro de Investigaciones sobre Desertificación, Universidad de Valencia.

Trejo, I., & Dirzo, R. (2000). Deforestation of seasonally dry tropical forest: A national and local analysis in Mexico. *Biological Conservation, 94*(2), 133-142. https://doi.org/10.1016/S0006-3207(99)00188-3

Tripathi, N., & Singh, R. (2009). Influence of different land uses on soil nitrogen transformations after conversion from an Indian dry tropical forest. *Catena, 77*, 226-233. https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.01.002

Turner, B. L., & Haygarth, P. M. (2001). Phosphorus solubilization in rewetted soils. *Nature, 411*(6835), 258-258. https://doi.org/10.1038/35077146

Valdespino, P., Romualdo, R., Cadenazzi, L., & Campo, J. (2009). Phosphorus cycling in primary and secondary seasonally dry tropical forests in Mexico. *Annals of Forest Science, 66*, 107. https://doi.org/10.1051/forest:2008075

Valencia-Esquivel, J. I. (2012). Efecto de plantaciones de restauración ecológica experimental en la caída de hojarasca en un pastizal tropical lluvioso en Los Tuxtlas, Veracruz. (Tesis de Licenciatura). Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Vargas Figueroa, J. A., Duque Palacio, O. L., & Torres González, A. M. (2015). Germinación de semillas de cuatro especies arbóreas del bosque seco tropical del Valle del Cauca, Colombia. *Revista de Biología Tropical, 63*(1), 249-261. ISSN 0034-7744

Vargas-Ríos, O., & Reyes, S. P. (2011). La restauración ecológica en la práctica: Memorias del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica. Universidad Nacional de Colombia. ISBN 978-958-719-741-9

Vázquez-Márquez, G. E., Ramírez-García, A. G., Palacios-Rangel, M. I., & Monterroso-Rivas, A. I. (2020). Conceptualización, manejo y monitoreo de áreas naturales protegidas en México: Caso Reserva Estatal Sierra Monte Negro, Morelos. *Investigación y Ciencia, 28*(79), 24-35. ISSN: 1665-4412

Vargas-Vázquez, V. A., Sánchez-Rangel, N. I., Hernández-Cuevas, L. V., & Guevara-Guerrero, G. (2021). Riqueza de especies de hongos micorrízicos asociados a plantas de la familia Euphorbiaceae en el Área Natural Protegida Altas Cumbres, Tamaulipas, México. *CienciaUAT, 16*(1), 6-19. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1527

Vázquez-Yanes, C., Bâtis-Muñoz, A., Alcocer-Silva, M., Gual-Díaz, M., & Sánchez-Dirzo, C. (2001). Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Vitousek, P. M., & Matson, P. A. (1985). Disturbance, nitrogen availability, and nitrogen losses in an intensively managed loblolly pine plantation. *Ecology, 66*, 1360-1376. https://doi.org/10.2307/1939189

Vitousek, P. M., & Matson, P. A. (1988). Nitrogen transformations in a range of tropical forest soils. *Soil Biology and Biochemistry, 20*(3), 361-367. https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90017-X

Vitousek, P. M., & Matson, P. A. (1993). Agriculture, the global nitrogen cycle, and trace gas flux. In *Biogeochemistry of Global Change: Radiatively Active Trace Gases* (pp. 193-208). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2812-8_10

Vitousek, P. M., J. M. Melillo (1979). Nitrate losses from disturbed forests: Patterns and mechanisms. *Forest Science, 25*(4), 605-619. https://doi.org/10.1093/forestscience/25.4.605

Von Carlowitz, P. G., Wolf, G. V., & Kemperman, R. E. M. (1991). The Multipurpose and Arbusto Database. An Information and Decision-Support System. Manual. Version 1.0. ICRAF.

Walker, T. W., & Syers, J. K. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma, 15*, 1-19. https://doi.org/10.1016/0016-7061(76)90066-5

Wallenstein, M. D., & Weintraub, M. N. (2008). Emerging tools for measuring and modeling the in situ activity of soil extracellular enzymes. *Soil Biology and Biochemistry, 40*(9), 2098-2106. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.024

Weiher, E., van der Werf, A., Thompson, K., Roderick, M., Garnier, E., & Eriksson, O. (1999). Challenging Theophrastus: A common core list of plant traits for functional ecology. *Journal of Vegetation Science, 10*(5), 609-620. https://doi.org/10.2307/3237076

Williams-Linera, G., Alvarez-Aquino, C., Hernández-Ascención, E., & Toledo, M. (2011). Early successional sites and the recovery of vegetation structure and tree species of the tropical dry forest in Veracruz, Mexico. *New Forests, 42*(2), 131-148. https://doi.org/10.1007/s11056-010-9242-8

Wright, S. J., Kitajima, K., Kraft, N. J. B., Reich, P. B., Wright, I. J., Bunker, D. E., . . . Zanne, A. E. (2010). Functional traits and the growth–mortality trade-off in tropical trees. *Ecology, 91*(12), 3664-3674.

Zimmerman, J. K., Pascarella, J. B., & Aide, T. M. (2007). Barriers to forest regeneration in an abandoned pasture in Puerto Rico. *Restoration Ecology, 15*(3), 336-346. https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80050.x

Zitzer, S. F., Archer, S. R., & Boutton, T. W. (1996). Spatial variability in the potential for symbiotic N_2 fixation by woody plants in a subtropical savanna ecosystem. *Journal of Applied Ecology, 33*(5), 1125-1136. https://doi.org/10.2307/2404692

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CIβyC
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

Cuernavaca, Morelos 24 marzo del 2025

Coordinación Académica
Maestría en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación
Presente

Como integrante de la Comisión Revisora y después de haber evaluado la tesis titulada **Evaluación de la restauración ecológica en una cantera de extracción de roca caliza en una Selva Baja Caducifolia en Tepetzingo, Morelos** de la alumna **Amalia Alicia Perdomo Rangel**, con número de matrícula **10064441**, aspirante al grado de Maestra en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, expreso mi decisión eligiendo la opción:

(X) Otorgo el voto por considerar que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado.

( ) No otorgo el voto aprobatorio por considerar que la tesis no está lista para ser presentada y defendida en el examen de grado.

Atentamente
Por una humanidad culta



_____
Dra. Patricia Valentina Carrasco Carballido
Integrante de la comisión revisora

C.i.p. – Archivo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

PATRICIA VALENTINA CARRASCO CARBALLIDO | Fecha:2025-04-09 06:24:56 | FIRMANTE

B0c0jBBfKVshE0rsDYe8PdLLphY9xLVbib4wEannsyZUEl9fKGi+MLo316gzaiAezBBukW3ioLfqaeselyF2GZxRIlwRdR+rAF/Nf6Z760xfNbGhswXNhXVOs5dawLGFwW4fDoM7Jm98J2Goxv6HtighcGhQe68777VuTLyrD96UPH/9Bz+fYtEKVp1Oj5ONP/hPy/3NnvfYwJNibREj3dNxw4hNMOWlKs8n4nhLlE08Eds6zN54ASBUUlNCB11OwQ2xjJlG+TPp+JoH78/iseZ1nCjA344xysdxyBR2K25O2xKcLCySr1R51ZDXMynJ8qRNslJ2bBXiYeDKdxngSQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

1TzfdinKN

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/OHmQ3vJD4HHTbE1tlqQnT7KTgY5yZOpu

INSTITUTO
DE ECOLOGIA
UNAM

Ciudad de México, abril 7, 2025

Coordinación Académica
Maestría en Biología Integrativa de la
Biodiversidad y la Conservación
Presente

Como integrante de la Comisión Revisora y después de haber evaluado la tesis titulada **Evaluación de la restauración ecológica en una cantera de extracción de roca caliza en una Selva Baja Caducifolia en Tepetzingo, Morelos**, de la alumna **Amalia Alicia Perdomo Rangel**, con número de matrícula **10064441**, aspirante al grado de Maestra en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, expreso mi decisión eligiendo la opción:

(**SI**) Otorgo el voto por considerar que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado.

( ) No otorgo el voto aprobatorio por considerar que la tesis no está lista para ser presentada y defendida en el examen de grado.

Atentamente

Dr. Homero Julio Eudes Campo Alves

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

HOMERO JULIO EUDES CAMPO ALVES | Fecha:2025-04-09 06:19:48 | FIRMANTE

EVpRTL4W7iSmezeaPEffJtt0bvVre4WbuxwG1fdz4BfwM4zwJVSQl1hUsDbZ8RgZ8rrv71k/Naqjqppc38LHV5eKKPk5mPoahysc+EPfb50X1nJQX9rWK1nAS76Fh+iaKTgApohhfC
yuikxEi/PTYu1NUc5JlDuQkp5Glaak5PHZeGb0iWt4JpEVbZqUwe+vzADmgKpP7viMsWl0YjhaTbgUYqaQXKTjxeVmoFHdCNP6huOf0NUDQHxfmcGttuo6o2NLlkjc9++P4mX1j97
FlvgMXGpwrSTg9OqJTIDYO1H3fUdfcsCZ+UUO0s617EKtBMkafsVxAg0lid181R6hQA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

RwJYrEu1k

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/YuaGrysCH3Q99CtfXlMhjUMU8egV81aj

Cuernavaca, Morelos, 10 de febrero de 2025

Coordinación Académica
Maestría en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación
Presente

Como integrante de la Comisión Revisora y después de haber evaluado la tesis titulada **Evaluación de la restauración ecológica en una cantera de extracción de roca caliza en una Selva Baja Caducifolia en Tepetzingo, Morelos** de la alumna **Amalia Alicia Perdomo Rangel**, con número de matrícula **10064441**, aspirante al grado de Maestra en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, expreso mi decisión eligiendo la opción:

(**X**) Otorgo el voto por considerar que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado.

( ) No otorgo el voto aprobatorio por considerar que la tesis no está lista para ser presentada y defendida en el examen de grado.

Atentamente

_____

M. en C. Gabriel Flores Franco

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

GABRIEL FLORES FRANCO | Fecha:2025-02-10 11:28:17 | FIRMANTE

kZ1pRLLQj7qi8yRKWGOfQi/L31z7ojKSZgEs9NtACpjto7e1pex6aeA15+ryT7lW+RDuQjKwNextWqwNZL2MhiPjXknbeEtEuyjacRs1PPHF4Ux5X/tzXyIH8LaAB5caz6KXIX4MZgeM8/Utti4JLw6YTMohmZfqqSB/BHwCm9j8VbGANxV9Wa/MW1t17iFvjOr/XRzUljkLeqmMx4HxgZ2mH6+PvRMi2lW3+6ugUC7+Q+bUHODscCKQpRIA+4wrZ9Gl2h+ScpqvN7yIRGQ8X95rC6fOal1OpnivLJKPkxIjIfycgvrKx/rILdOg+BxCDXvJVmO0LT+DeOGg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

XK1F4a89y

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/9XfhEC1ykxXgvvH8bzHlakVO7Z4cL5l7

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

CIβγC
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN

Cuernavaca, Morelos, 25 de marzo de 2025

Coordinación Académica
Maestría en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación
Presente

Como integrante de la Comisión Revisora y después de haber evaluado la tesis titulada **Evaluación de la restauración ecológica en una cantera de extracción de roca caliza en una Selva Baja Caducifolia en Tepetzingo, Morelos** de la alumna **Amalia Alicia Perdomo Rangel**, con número de matrícula **10064441**, aspirante al grado de Maestra en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, expreso mi decisión eligiendo la opción:

(**X**) Otorgo el voto por considerar que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado.

( ) No otorgo el voto aprobatorio por considerar que la tesis no está lista para ser presentada y defendida en el examen de grado.

Atentamente

_____

Dra. Paula Vargas Pellicer

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

PAULA VARGAS PELLICER | Fecha:2025-03-26 09:13:58 | FIRMANTE

LHozmRnJ5KqVo4lpo08CnDSSupmKaYVqN7tm5iTng0weF4AWgscXOCkulJQ+V6yy70fA9Fk9l7mCPXCWL95Ksd30dGAWWmEjyW3Gv/S57rWnJugP9ADODDSFafJr6VC2UHjQKoQovxlUIrnNZYQw+tvGMkfKfKde2ke5ZH0igkisFPF7OwchQMIQ7sV9azLGUPgIy77K1O6raPrFaW5quTuk+TZiB97HKvZ1SMscy+iR5X4ouvorj/Wyjv/1MhRz2xTL7+Qn6Kw7JjlkrqupUiryh1b7CpR/EbTi50ZSkEVskYqJEM99z6E9ohMat+T2b4SabPXBvEWmGRqSCLxc9w==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

HOX0zSYVy

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/cMkgNyc91duQdRIVQftb4PrXkTgnCfCb

Cuernavaca, Morelos, 7 de febrero de 2025

Coordinación Académica
Maestría en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación
Presente

Como integrante de la Comisión Revisora y después de haber evaluado la tesis titulada **Evaluación de la restauración ecológica en una cantera de extracción de roca caliza en una Selva Baja Caducifolia en Tepetzingo, Morelos** de la alumna **Amalia Alicia Perdomo Rangel**, con número de matrícula **10064441**, aspirante al grado de Maestra en Biología Integrativa de la Biodiversidad y la Conservación, expreso mi decisión eligiendo la opción:

(X) Otorgo el voto por considerar que la tesis reúne los requisitos para ser presentada y defendida en el examen de grado.

( ) No otorgo el voto aprobatorio por considerar que la tesis no está lista para ser presentada y defendida en el examen de grado.

Atentamente

_____

Dr. Xavier López Medellín

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANÓ INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

XAVIER LOPEZ MEDELLIN | Fecha:2025-02-07 12:55:12 | FIRMANTE

u02XURhC5ER5VB3i7jzblnRj/3OMjHlJWHIBNhFK6lx5qAHH2iWGUI831Gf9vawp24Lv3ZbH+QXcP5HMrrpe6HQCN3CtesA2dIMmZg0NbOqxqJoozXouWCjADHWBbgX+FuYx+VtIMs37TKlKzsKJKL0sCKpsdBE54F57pHT4oSYzvgab+q1aByHibyatHUlGDpxEncIM0N+VqmTrq1B/XFQGcEzKbbnF7JyV2avLJobGJRBESvKw0WEe0WvR20jpyR6rbA1GcgPhmODsGY8BwhUa/Ai7qWJ8ZtcN3rNLgS7cvBw5XtUrSFA0Dcp7ZLDqiPhKbtH+QXcakcqvbSggwg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

0uV1ZzfKC

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/fwyNKuWa3102CvIcLZJWHr1N9gPnhHTe