

UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE  
DIOS  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL  
Y MEDIO AMBIENTE



**TESIS**

**Macrofauna edáfica como indicador biológico de la recuperación de  
suelos degradados en una cronosecuencia post-minería aurífera en la  
Comunidad Nativa de San Jacinto, distrito de Tambopata – Madre de  
Dios**

PARA OPTAR EL TITULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO  
FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE

AUTOR:

Bachiller: HERRERA MACHACA, Marx  
Antony

ASESOR:

Ph.D: PEÑA VALDEIGLESIAS, Joel

CO-ASESOR:

M.Sc: GARATE QUISPE, Jorge  
Santiago

Puerto Maldonado, 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE MADRE DE  
DIOS

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL  
Y MEDIO AMBIENTE



**TESIS**

**Macrofauna edáfica como indicador biológico de la recuperación de  
suelos degradados en una cronosecuencia post-minería aurífera en la  
Comunidad Nativa de San Jacinto, distrito de Tambopata – Madre de  
Dios**

PARA OPTAR EL TÍTULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO  
FORESTAL Y MEDIO AMBIENTE

AUTOR:

Bachiller: HERRERA MACHACA, Marx  
Antony

ASESOR:

Ph.D: PEÑA VALDEIGLESIAS, Joel

CO-ASESOR:

M.Sc: GARATE QUISPE, Jorge  
Santiago

Puerto Maldonado, 2023

## **Agradecimiento**

Al consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) (Proyecto CONTRATO 083-2021-FONDECYT), en el marco de un acuerdo de cooperación científica con el Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana y la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

Al vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.

A mis asesores, Dr. Joel Peña valdeiglesia y al M.Sc. Jorge Santiago Garate Quispe, quienes me orientaron de manera incondicional en el proceso de mi investigación.

A mis compañeros y amigos quienes me ayudaron en las salidas de campo y laboratorio.

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

12%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

|   |                                                                                                                                                                                     |    |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | <a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a><br>Fuente de Internet                                                                                                           | 3% |
| 2 | <a href="https://repositorio.unamad.edu.pe">repositorio.unamad.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                                                                                     | 2% |
| 3 | <a href="https://scielo.sld.cu">scielo.sld.cu</a><br>Fuente de Internet                                                                                                             | 1% |
| 4 | Mendoza Arviso Maria Silvia. "Los insectos colembolos y la sucesion secundaria del bosque mesofilo de la Reserva de la Biosfera El Cielo Tamaulipas", TESIUNAM, 1995<br>Publicación | 1% |
| 5 | <a href="https://repositorio.una.edu.ni">repositorio.una.edu.ni</a><br>Fuente de Internet                                                                                           | 1% |
| 6 | <a href="https://repositorio.ikiam.edu.ec:8080">repositorio.ikiam.edu.ec:8080</a><br>Fuente de Internet                                                                             | 1% |
| 7 | Ramírez Gutiérrez Arturo. "Densidad de la fauna edáfica como indicador de calidad del suelo en bosques templados y zonas adyacentes en México", TESIUNAM, 2008<br>Publicación       | 1% |

## Resumen

El objetivo del presente estudio fue evaluar la macrofauna edáfica como indicador biológico de la recuperación de suelos degradados en una cronosecuencia post-minería. Se utilizó la metodología de extracción manual propuesta por el programa de biología y fertilidad de suelo. Se recolectaron 4 réplicas de muestras de suelo mediante monolitos, en parcelas con diferentes tiempos de abandonos y bosque de referencia. Los resultados indicaron que existe un patrón progresivo de la abundancia y biomasa en los diferentes tiempos de abandono. Los grupos funcionales más predominantes fueron los ingenieros del suelo. Mientras que los órdenes más representativos fueron Hymenoptera y oligochetos. La riqueza de la vegetación tuvo influencia positiva en la abundancia, riqueza y biomasa de la macrofauna, pero no fue significativa ( $p > 0,05$ ). La capacidad de intercambio catiónico tuvo un efecto significativo en la biomasa de la macrofauna edáfica ( $r = 0,97$ ;  $p < 0,05$ ). No se encontraron diferencias significativas en la composición de macrofauna en los tiempos de abandono, pero si en los estratos de 10 y 20 cm con la hojarasca (Permanova  $< 0,05$ ). Las especies más contribuyentes a la diferenciación fueron himenópteros y oligochetos. Asimismo, se evidenció a isópteros como posible indicadora del bosque de referencia (IndVal- $p < 0,05$ ).

Palabras clave: amazonia peruana, cronosecuencia, calidad de suelo

## **Abstract**

The objective of this study was to evaluate the edaphic macrofauna as a biological indicator of the recovery of degraded soils in a post-mining chronosequence. The manual extraction methodology proposed by the soil biology and fertility program was used. Four replicates of soil samples were collected using monoliths, in plots with different abandonment times and reference forest. The results indicated that there is a progressive pattern of abundance and biomass in the different abandonment times. The most predominant functional groups were the soil engineers. The most representative orders were Hymenoptera and oligochaetes. The richness of the vegetation had a positive influence on the abundance, richness and biomass of the macrofauna, but it was not significant ( $p > 0.05$ ). Cation exchange capacity had a significant effect on the biomass of edaphic macrofauna ( $r = 0.97$ ;  $p < 0.05$ ). No significant differences were found in macrofaunal composition at the abandonment times, but significant differences were found in the 10 and 20 cm strata with leaf litter (Permanova  $< 0.05$ ). The species most contributing to the differentiation were hymenoptera and oligochaetes. Likewise, isoptera was found to be a possible indicator of the reference forest (IndVal- $p < 0.05$ ).

Key words: peruvian amazon, chronosequence, soil quality

## **Introducción**

El incremento de la degradación de suelos a nivel local, nacional y global (Xie et al. 2020 ; Khaledian et al. 2017 ; Aragón-Gastélum et al. 2014), ha permitido desarrollar diversos métodos para determinar, rehabilitar y monitorear la calidad y salud del suelo (Menta y Remelli 2020 ; Stanturf 2021).

En la presente investigación se pretende evaluar el potencial de la macrofauna edáfica como indicador biológico de la recuperación de suelos degradados por minería de oro en la Amazonia de Madre de Dios. Se analizará la influencia de la vegetación y las características físico-químicas del suelo en la diversidad de la macrofauna a lo largo de una cronosecuencia de sucesión secundaria después de actividades mineras. En el muestreo y análisis se considerará distintos tiempos de abandono y se comparará con un bosque de referencia cercano. Todo esto nos permitirá determinar el índice biótico de la calidad del suelo e identificar especies de macrofauna indicadoras de la recuperación de la calidad del suelo en áreas abandonadas por minería aurífera.

El presente estudio es importante porque llenará un vacío de conocimiento sobre la macrofauna edáfica en áreas sucesionales severamente impactadas por la minería aurífera. Esto debido a que la macrofauna edáfica es considerado como un excelente indicador para monitorear sitios perturbados o degradados (Kamau et al. 2017 ; Pinzón et al. 2015 ; Sardo y Lima 2019 ; Majeed et al. 2018 ; Vasconcellos et al. 2013), debido a que tienen la capacidad reflejar cambios y favorecer funciones claves que sustentan los ecosistemas mediados por el suelo.

# Índice

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....                                     | 1  |
| 1.1. Descripción del problema.....                                              | 1  |
| 1.2. Formulación del problema .....                                             | 2  |
| 1.3. Objetivos.....                                                             | 3  |
| 1.3.1. Objetivo general .....                                                   | 3  |
| 1.3.2. Objetivos específicos.....                                               | 3  |
| 1.4. Variables.....                                                             | 4  |
| 1.4.1. Variables independientes.....                                            | 4  |
| 1.4.2. Variables dependientes.....                                              | 4  |
| 1.5. Operacionalización de variables .....                                      | 4  |
| 1.6. Hipótesis .....                                                            | 5  |
| 1.8. Consideraciones éticas .....                                               | 6  |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....                                                 | 8  |
| 2.1. Antecedentes de estudio.....                                               | 8  |
| 2.1.1. Estudios de la composición funcional de la macrofauna edáfica .....      | 8  |
| 2.1.2. Estudios de la diversidad, abundancia y biomasa de la macrofauna edáfica | 8  |
| 2.1.3. Estudios de macrofauna edáfica como indicadores biológicos .....         | 11 |
| 2.2. Marco teórico .....                                                        | 14 |
| 2.2.2. Características de la macrofauna edáfica .....                           | 14 |
| 2.2.3. Importancia de la macrofauna.....                                        | 14 |
| 2.2.4. Grupos funcionales de la macrofauna edáfica .....                        | 15 |
| 2.2.5. La macrofauna y su relación con el suelo .....                           | 16 |
| 2.2.6. ¿Qué son las especies indicadoras de hábitat?.....                       | 18 |
| 2.2.7. Clasificación de especies indicadoras .....                              | 18 |
| 2.2.8. Método frecuente para seleccionar especies indicadoras del hábitat       | 18 |
| 2.2.9. Indicadores de calidad de suelo .....                                    | 19 |
| 2.2.10. Principales componentes de la calidad de suelo .....                    | 20 |
| 2.2.11. Condiciones que deben cumplir los indicadores de la calidad del suelo   | 20 |
| 2.2.12. Medición de la diversidad.....                                          | 21 |
| 2.2.13. Sucesión ecológica .....                                                | 21 |
| 2.2.14. Sucesión primaria.....                                                  | 22 |
| 2.2.15. Sucesión secundaria.....                                                | 22 |
| 2.2.16. Cronosecuencia.....                                                     | 22 |
| 2.3. Definición de términos .....                                               | 23 |

|                                                            |                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.4.1.                                                     | Sucesión: .....                                                                        | 23 |
| 2.4.2.                                                     | Sucesión secundaria: .....                                                             | 23 |
| 2.4.3.                                                     | Macrofauna edáfica: .....                                                              | 23 |
| 2.4.4.                                                     | Diversidad biológica: .....                                                            | 23 |
| 2.4.5.                                                     | Calidad de suelo: .....                                                                | 23 |
| 2.4.6.                                                     | Cronosecuencia: .....                                                                  | 23 |
| 2.4.7.                                                     | Sucesión ecológica: .....                                                              | 23 |
| CAPITULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN .....           |                                                                                        | 24 |
| 3.1.                                                       | Tipo de estudio .....                                                                  | 24 |
| 3.2.                                                       | Diseño del estudio.....                                                                | 24 |
| 3.3.                                                       | Población y muestra .....                                                              | 24 |
| 3.3.1.                                                     | Población .....                                                                        | 24 |
| 3.3.2.                                                     | Muestra .....                                                                          | 24 |
| 3.4.                                                       | Métodos y técnicas .....                                                               | 25 |
| 3.4.1.                                                     | Lugar de estudio.....                                                                  | 25 |
| 3.4.2.                                                     | Clima .....                                                                            | 25 |
| 3.4.3.                                                     | Técnicas de muestreo de la macrofauna edáfica .....                                    | 26 |
| 3.4.4.                                                     | Composición funcional de la macrofauna edáfica.....                                    | 28 |
| 3.4.5.                                                     | Determinación de las características físicas y químicas del suelo.....                 | 28 |
| 3.4.6.                                                     | Determinación de los índices de diversidad.....                                        | 28 |
| 3.4.7.                                                     | Método del valor del indicador (indVal) .....                                          | 29 |
| 3.5.                                                       | Tratamiento de los datos.....                                                          | 29 |
| 3.5.1.                                                     | Manejo de base de dato.....                                                            | 29 |
| 3.5.2.                                                     | Análisis descriptivo y exploratorio.....                                               | 29 |
| 3.5.3.                                                     | Análisis inferencial.....                                                              | 30 |
| CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN ..... |                                                                                        | 31 |
| 4.1.                                                       | Abundancia, riqueza, diversidad y biomasa de la macrofauna.....                        | 31 |
| 4.1.1.                                                     | Abundancia, riqueza y diversidad de macrofauna en una cronosecuencia post-minería..... | 31 |
| 4.1.2.                                                     | Biomasa de macrofauna .....                                                            | 36 |
| 4.2.                                                       | Características físico-químicas del suelo .....                                        | 39 |
| CONCLUSIONES.....                                          |                                                                                        | 47 |
| SUGERENCIAS .....                                          |                                                                                        | 48 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                            |                                                                                        | 49 |
| ANEXOS.....                                                |                                                                                        | 63 |

## Índice de figuras

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Clasificación del tamaño de los organismos del suelo.....                                                 | 17 |
| Figura 2.Principales componentes de la calidad de suelo .....                                                       | 20 |
| Figura 3. Mapa de ubicación.....                                                                                    | 25 |
| Figura 4. Muestreo de la vegetación en áreas con regeneración natural. ...                                          | 26 |
| Figura 5. Pasos a seguir para el muestreo, recolección preservación de la macrofauna edáfica in situ. ....          | 27 |
| Figura 6. Metodología a emplear en el muestreo de suelos .....                                                      | 28 |
| Figura 7. Abundancia (Ind.m <sup>2</sup> ) de la macrofauna edáfica .....                                           | 34 |
| Figura 8. Biomasa de la macrofauna edáfica por estratos.....                                                        | 37 |
| Figura 9. Biomasa total de la macrofauna a lo largo de una cronosecuencia post-minería y bosque de referencia. .... | 38 |
| Figura 10. Biomasa a lo largo de una cronosecuencia post-minería y bosque de referencia. ....                       | 39 |
| Figura 11. Correlación de la biomasa (g/m <sup>2</sup> ) y abundancia con los tiempos de abandono.....              | 42 |
| Figura 12. Curva de rango-abundancia. ....                                                                          | 46 |

## Índice de tablas

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Operacionalización de variables. ....                                                                                                                          | 4  |
| Tabla 2. Abundancia, riqueza, diversidad taxonómica de macrofauna y frecuencia relativa (Fr %) en una cronosecuencia post-minería aurífera y bosque de referencia. .... | 31 |
| Tabla 3. Abundancia y riqueza taxonómica de macrofauna del suelo por estratos. ....                                                                                     | 33 |
| Tabla 4. Densidad (Ind. m <sup>2</sup> ) de la distribución de la macrofauna del suelo a lo largo de una cronosecuencia post-minería y bosque de referencia. ....       | 35 |
| Tabla 5. Composición funcional de la macrofauna del suelo en cada tiempo de abandono y bosque de referencia. ....                                                       | 36 |
| Tabla 6. Análisis de suelo por cada parcela de tiempos de abandono. ....                                                                                                | 40 |
| Tabla 7. Variación de las propiedades físico-químicas en las parcelas. ....                                                                                             | 40 |
| Tabla 8. Correlación de las características físico-químicas con la macrofauna. ....                                                                                     | 41 |
| Tabla 9. Abundancia y riqueza de especies vegetales a lo largo de una cronosecuencia post-minería. ....                                                                 | 42 |
| Tabla 10. Correlación de la abundancia y riqueza vegetal con la macrofauna edáfica. ....                                                                                | 44 |
| Tabla 11. Resultados del permanova de 2 vías de macrofauna. ....                                                                                                        | 44 |
| Tabla 12. Prueba Permanova por pares para la macrofauna. ....                                                                                                           | 44 |
| Tabla 13. Especies indicadoras (Taxa orden) de la macrofauna edáfica determinada mediante el método IndVal. ....                                                        | 46 |

## **CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.1. Descripción del problema**

En las últimas décadas, la degradación de suelos es considerada un problema global (Xie et al. 2020 ; Khaledian et al. 2017 ; Aragón-Gastélum et al. 2014), convirtiéndose repentinamente en un conflicto social y económico (Xie et al. 2020). Este trágico incremento de la degradación ha llevado a la necesidad de identificar métodos para determinar no solo la calidad del suelo sino también, en un enfoque holístico la salud del suelo (Menta y Remelli 2020 ; Stanturf 2021).

En Madre de Dios, la minería del oro, es una de las actividades responsables de la deforestación, fragmentación, contaminación y degradación de suelos (Román-Dañobeytia et al. 2015 ; Velásquez et al. 2020 ; Kahhat et al. 2019 ; Sánchez-Cuervo et al. 2020), representando una amenaza ecológica (Asner y Tupayachi 2016). Aproximadamente han sido deforestadas 100 000 ha de bosque durante el periodo 1984-2017 (Csillik y Asner 2020), ocasionando impactos negativos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, disminuyendo la calidad y salud del suelo ( Borges et al. 2019 ; Binkley y Fisher 2019 ; Román-Dañobeytia et al. 2020).

Este tipo de degradación originado por la minería afecta el establecimiento natural de la cobertura vegetal (Rocha-Nicoleite et al. 2018). Sin embargo, el proceso de sucesión ecológica se hace presente en los sitios abandonados en mediano o largo plazo.

En la actualidad se han llevado a cabo estudios sobre la estructura y composición florística en diferentes estadios sucesionales a través de la regeneración natural en áreas abandonadas por minería, siendo bastante

estudiados (Amazonas et al. 2017 ; Canahuire 2017 ; Granados-Victorino et al. 2017 ; Sajami 2017 ; Martínez-Ruiz et al. 2007 ; Rodrigues, Martins y de Barros 2004), sin embargo son escasos los estudios de la macrofauna asociado con los cambios en el suelo durante el proceso de sucesión (Amazonas et al. 2017) y como la interacción entre la vegetación existente y la macrofauna son capaces de modificar la estructura del suelo (Sardo y Lima 2019).

En las últimas dos décadas, los estudios sobre el estado del suelo, se han basado en la evaluación de macrofauna (Menta y Remelli 2020), siendo en muchas ocasiones estudiados por ser bioindicadores de calidad del suelo (Pinzón et al. 2015), al favorecer funciones claves que sustentan los ecosistemas mediados por el suelo (Kamau et al. 2017), ayudando en la descomposición y mineralización de materia orgánica del suelo (Baretta, Brown y Cardoso 2010 ; Marx et al. 2016 ; Laird-Hopkins et al. 2017 ; Wu y Wang 2019) debido a la cantidad, la calidad de hojarasca (Handa et al. 2014 ; Borges et al. 2019).

Esta capacidad de la macrofauna edáfica para reflejar cambios que ocurren en el suelo, le permite ser un indicador eficiente para monitorear sitios perturbados (Sardo y Lima 2019 ; Majeed et al. 2018 ; Vasconcellos et al. 2013). Siendo cada vez más relevante comprender los procesos de sucesión secundaria asociado a la macrofauna edáfica en áreas impactadas por actividades mineras en la amazonia peruana.

## **1.2. Formulación del problema**

De acuerdo con la descripción del problema, se formula las siguientes preguntas:

### **Problema general:**

¿En qué medida la macrofauna edáfica es un buen indicador de recuperación de suelos degradados en una cronosecuencia Post-minería aurífera en la Comunidad Nativa de San Jacinto, distrito de Tambopata – Madre de Dios?

### **Problema específico:**

- P.E.1 ¿Cuánto es la abundancia, riqueza, diversidad y biomasa de la macrofauna edáfica en una cronosecuencia Post-minería?
- P.E.2 ¿en qué medida influye las características físicas y químicas del suelo en relación con la abundancia, biomasa, riqueza de macrofauna edáfica?
- P.E.3 ¿en qué medida influye la vegetación en la abundancia, riqueza y biomasa de la macrofauna edáfica?
- P.E.4 ¿Cómo influencia el tiempo de abandono por actividades mineras en la macrofauna edáfica en comparación con el bosque de referencia?
- P.E.5 ¿Cuáles son las especies indicadoras de recuperación de áreas degradadas en una cronosecuencia Post-minería aurífera?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar el potencial de la macrofauna edáfica como indicador biológico de la recuperación de suelos degradados en una cronosecuencia Post-minería en la Comunidad Nativa de San Jacinto, distrito de Tambopata – Madre de Dios

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- OE1: Determinar la abundancia, riqueza, diversidad y biomasa de la macrofauna edáfica en una cronosecuencia Post-minería.
- OE2: Evaluar la influencia de las características físicas y químicas del suelo en la abundancia, biomasa y riqueza de la macrofauna del suelo.
- OE3: Evaluar la influencia de la vegetación en la abundancia, biomasa y riqueza de la macrofauna del suelo.
- OE4: Analizar cambios en la macrofauna edáfica a lo largo de un cronosecuencia Post-minería y comparar con un bosque de referencia.
- OE5: Identificar ordenes de macrofauna indicadoras de calidad de suelo para monitorear la mejoría de los suelos producto de la minería del oro.

## 1.4. Variables

### 1.4.1. Variables independientes

- Tipo de sitio según tiempo de abandono (cronosecuencia)
- Características físicas y químicas del suelo
- Atributos florísticos (diversidad de flora)

### 1.4.2. Variables dependientes

- Abundancia
- Biomasa
- Diversidad
- Riqueza
- Grupo funcional
- Taxón indicador

## 1.5. Operacionalización de variables

En la tabla 1, se detalla la operacionalización de variables de la presente tesis.

Tabla 1. Operacionalización de variables.

| DEFINICIÓN CONCEPTUAL                                                                                                                                                                                        | DEFINICIÓN OPERACIONAL                                                                                                                                               | DIMENSIONES                        | INDICADORES                                                                                                                                                            | ÍTEMS                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Variable Independiente</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tiempo de abandono (cronosecuencia)</li> <li>▪ Parámetros del suelo</li> <li>▪ Atributos florísticos (diversidad de flora)</li> </ul> | <b>Variable Independiente</b><br>Identificación de parcelas en total abandono, muestreos del suelo e inventario de la regeneración natural de las especies vegetales | D1: Año de abandono                | Tiempo                                                                                                                                                                 | Años                                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                      | D2: Propiedades físicas y químicas | <b>Física:</b> Contenido de área, Arcilla y limo, Contenido de materia orgánica.<br><b>Química:</b> pH, K, P, Cationes cambiabiles, Capacidad de Intercambio Catiónico | <b>Física:</b> %<br><b>Química:</b> ppm, mg kg <sup>-1</sup>                             |
|                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                      | D3: Diversidad de flora            | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abundancia</li> <li>▪ Riqueza</li> </ul>                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ind/m<sup>2</sup></li> <li>▪ Ordenes</li> </ul> |
| <b>Variable Dependiente</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abundancia</li> <li>▪ Biomasa</li> <li>▪ Diversidad</li> <li>▪ Riqueza</li> <li>▪ Grupo funcional</li> <li>▪ Taxon indicador</li> </ul> | <b>Variable Dependiente</b><br>Muestreo de monolitos de suelo en parcelas con regeneración natural con diferentes tiempos de abandono                                | D1: Abundancia                     | Número de individuos                                                                                                                                                   | Ind/m <sup>2</sup>                                                                       |
|                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                      | D2: Biomasa                        | Peso de los individuos                                                                                                                                                 | g/m <sup>2</sup>                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                      | D3: Diversidad                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Índice de Shannon</li> <li>▪ Índice de Simpson</li> </ul>                                                                     | Adimensional                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                      | D4: Riqueza                        | Numero de ordenes                                                                                                                                                      | Ordenes                                                                                  |

**Continuación Tabla 1.** Operacionalización de variables.

| DEFINICIÓN CONCEPTUAL | DEFINICIÓN OPERACIONAL | DIMENSIONES                   | INDICADORES                    | ITEMS        |
|-----------------------|------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|
|                       |                        | D5: Grupo funcional           | ■ Grupos de taxones            | Ordenes      |
|                       |                        | D6: Taxon indicador del suelo | Método de especies indicadores | Adimensional |

## 1.6. Hipótesis

### 1.1.1. Hipótesis general

La macrofauna edáfica es un buen indicador biológico de la recuperación de suelos degradados en una cronosecuencia Post-minería aurífera.

### 1.1.2. Hipótesis específicas

- HE1. El incremento en abundancia, riqueza, diversidad y biomasa de la macrofauna edáfica serán diferentes en una cronosecuencia Post-minería.
- HE2. Las características físico-químicas del suelo están correlacionados con la abundancia, biomasa, riqueza de la macrofauna del suelo.
- HE3. La vegetación esta correlacionado con la abundancia, biomasa, riqueza de la macrofauna del suelo.
- HE4. Los cambios en la macrofauna edáfica son diferentes a mayores tiempos de abandono y diferentes al bosque de referencia.

## 1.7. Justificación

Estudiar la macrofauna edáfica es relevante porque permite monitorear la perturbación ocurrida en el ambiente (Martins et al. 2017 ; Vasconcelos et al. 2020) y la rehabilitación de suelos contaminados o degradados en un periodo determinado (Cabrera 2019) sirviendo como un indicador temprano de degradación o recuperación de los suelos (Cardoso et al. 2013). Por lo tanto, es importante conocer la biodiversidad de estos organismos en los ecosistemas originales y en las áreas en recuperación después de impactos antrópicos (Rousseau et al. 2014). Uno de los enfoques más utilizados para entender el papel de los macroinvertebrados en el funcionamiento del suelo es identificar los grupos clave y analizar qué factores influyen en su composición (Rousseau et al. 2014). Los factores más frecuentemente

analizados son: (1) intensidad de uso de suelo, (2) fuego, (3) tiempo de abandono y (4) el tipo de restauración (Rossi et al. 2006 ; Mathieu et al. 2005 ; Gongalsky et al. 2012 ; Pais y Varanda 2010).

En la actualidad, existen diversos estudios que evidencian que la macrofauna edáfica es un excelente indicador de calidad de suelo (Almeida et al. 2017). Esto debido a que algunas especies de Macrofauna edáficas son muy susceptible a la degradación y fragmentación de los bosques (Nunes et al. 2019 ; Silva et al. 2018). Sin embargo, el conocimiento sobre su potencial como indicador biológico de la recuperación de suelos degradados por minería de oro a nivel nacional, y en especial en la Amazonia, es limitada.

El estudio planteado permitirá conocer cómo se relacionan los índices de diversidad de la macrofauna edáfica con las características físicas, químicas del suelo y la abundancia de la vegetación en distintos tiempos de abandono (cronosecuencia) después de actividades mineras. Además, realizaremos comparaciones entre los atributos de la macrofauna edáfica y las características físico-químicas del suelo de las áreas en regeneración natural con el bosque de referencia, con la finalidad de estimar el grado de recuperación de estas áreas abandonadas. Esto también permitiría evaluar el potencial de la macrofauna como indicador biológico de la recuperación de suelos degradados por minería de oro en Madre de Dios.

Los resultados del presente estudio proporcionarán información valiosa sobre (1) los cambios en la macrofauna del suelo a lo largo de una cronosecuencia de sucesión secundaria, (2) la calidad de suelo y también permitirá identificar especies indicadoras según la calidad de suelo. Asimismo, los hallazgos del presente estudio podrán ser utilizados como referencia para futuros proyectos de recuperación y rehabilitación de suelos degradados por minería aurífera en la Madre de Dios.

## **1.8. Consideraciones éticas**

El presente estudio, fue planteado respetando el “Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios” versión 3, aprobada mediante la resolución de consejo universitario N° 288-

2022-UNAMAD-CU. En el contexto científico, las referencias fueron citadas respetando siempre los derechos de autoría, siguiendo las pautas de la Conducta Responsable en Investigación (CRI) establecida por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC). En cuanto a la metodología del estudio, se preverá no generar impactos negativos en el ambiente, siguiendo las metodologías propuestas por el Ministerio del Ambiente (2014) para el muestreo de suelo, y por el programa de Investigación Tropical de Biología del Suelo y Fertilidad propuesto por Anderson y Ingram (1993) para las técnicas de muestreo de la macrofauna edáfica. En cuanto a los softwares estadísticos, Past 4,03 y Rstudio son softwares libres y PRIMER v7 es software comercial, el cual se tiene licencia con número de serie 6655.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Antecedentes de estudio**

#### **2.1.1. Estudios de la composición funcional de la macrofauna edáfica**

##### **Escala internacional**

Estudios sobre la composición funcional se han realizado en bosques secundarios, pastizales, áreas de cultivo, sistemas agroforestales con diferentes tiempos de uso, siguiendo la metodología propuesta por el programa de Investigación “Tropical Soil Biology and Fertility” (Anderson y Ingram 1993). Los resultados de los estudios indican que hay una mayor representatividad de la densidad, en los ingenieros del suelo y detritívoros; en cuanto a la biomasa se destacan a los detritívoros y herbívoros (Cabrera, Robaina y Ponce de Leon 2011), demostrando que existe una variación notoria de los grupos funcionales de acuerdo al grado de perturbación, intensidad de uso y los recursos disponibles del suelo (Gutiérrez-Bermúdez, Mendieta-Araica y Noguera-Talavera 2020 ; García, Ramírez y Sánchez 2018 ; Cabrera, Robaina y Ponce de Leon 2011).

#### **2.1.2. Estudios de la diversidad, abundancia y biomasa de la macrofauna edáfica**

##### **Escala internacional**

Hernández-chávez et al. (2020) indican que la diversidad y abundancia de macrofauna son similares entre los sistemas pastoriles y pastos naturales, indicando que en ambos hubo mayor predominio de coleópteros y olichetos.

Ramírez-barajas et al. (2019) evaluaron distintos usos de sistema silvipastoriles asociado a *leucaena leucocephala*, pastizal de *brachiaria* con árboles dispersos y bosque seco tropical, los resultados indican que la mayor

diversidad de macrofauna se encuentra en sistemas silvipastoriles asociadas con especies *leucaena leucocephala*, demostrando que incluir componentes leñosos ayuda a la macrofauna a establecerse.

Kamau et al. (2017) evaluaron la influencia espacial de tres árboles dominantes sobre la abundancia de macrofauna edáfica, a lo largo de un gradiente de degradación del suelo producto del cultivo intensivo de 10, 16 y 62 años, planteándose la hipótesis de que la variación espacial en la abundancia de la macrofauna es afectada por los años del cultivo y las especies de árboles. Los resultados indican que la mayor abundancia de los macroinvertebrados se encontró en los cultivos de 16 y 62 años, dependiendo de las especies arbóreas y el grupo de los macroinvertebrados. La abundancia de lombrices de tierra fue mayor debajo del dosel de *Zanthoxylum gillettii* con un promedio de 389 individuos m<sup>-2</sup>, mientras que los escarabajos tuvieron una abundancia más alta bajo *Eucalyptus grandis* y *Croton megalocarpus* los cultivos de 16 años. El mayor número de termitas y ciempiés se encontró bajo la especie arbórea *Croton megalocarpus* del cultivo de 10 años. Estos hallazgos indican cuán importante es la diversidad arbórea para conservar la macrofauna edáfica.

Rousseau, Rogério y Celentano (2014) evaluaron la diversidad de la macrofauna edáfica en una cronosecuencia de capoeiras y bosques del centro de endemismo belén. Los resultados indican que el uso del suelo redujo la abundancia y la riqueza de predadores, indicando alteraciones significativas en el funcionamiento del suelo. Estos hallazgos muestran un efecto duradero de la degradación sobre la macrofauna del suelo y sus funciones ecológicas.

Tulande et al. (2018) evaluaron el efecto de las variables fisicoquímicas del suelo en la abundancia, riqueza y biomasa de la macrofauna en tres áreas de bosque montano con diferentes edades post tala (0, 2 y 5 años) indicando que la abundancia, riqueza y biomasa de la macrofauna fueron menores en el área 0 años que en otras áreas, además la similitud de la macrofauna con el bosque de referencia no aumentó con los años posteriores a la tala,

debiéndose su resultado a los cambios en las características del suelo, provocadas por la tala, las variables del suelo como pendiente, temperatura, densidad aparente, densidad real, potencial de hidrogeno (pH), fósforo (P), sodio (Na) y potasio (K), estuvieron asociados directamente con la abundancia de la macrofauna.

Amazonas et al. (2017) evaluaron los cambios de la densidad y la diversidad de macrofauna edáfica en una cronosecuencia durante la sucesión secundaria en la mata atlántica, los resultados mostraron patrones claros de cambios, la densidad no aumento a lo largo de la sucesión secundaria, pero tuvo una asociación significativa con la cobertura del dosel, en cuanto a la diversidad, esta fue caracterizada por la alta dominancia de insectos sociales y equidad entre los demás grupos. revelando que el potencial de la macrofauna edáfica debe ser estudiada para estudios de restauración de ecosistemas tropicales.

### **Escala nacional**

Castillo (2016) evaluó la abundancia y diversidad de la macrofauna del suelo en tres diferentes sistemas de uso del suelo: (1) vegetación natural, (2) cultivo, (3) pastoreo, registrándose taxonómicamente dos phyla, cuatro clases, 11 órdenes y 18 familias. Los resultados indican que la diversidad de macrofauna en los tres sistemas es similar ( $p > 0,05$ ), mientras que en la abundancia resulto diferente ( $p < 0,05$ ), siendo la familia campodeidaes en que presento mayor abundancia relativa en la vegetación natural.

Martines (2019) evaluó la correlación de la macrofauna con las propiedades físicas del suelo en los sistemas de uso de tierra: (1) Bosques secundarios, (2) Cultivo de café y (3) Cultivo de cacao. Los resultados indican en los suelos de bosque secundario hubo mayor cantidad de macrofauna proporcionando una mayor biomasa que promueve la actividad de grupo funcional ingenieros. La abundancia de la macrofauna está asociada directamente con la textura, contenido de potasio, contenido de materia orgánica y contenido de intercambio catiónico.

Zavaleta (2019) evaluó la asociación de la macrofauna edáfica con las propiedades físico-química del suelo en cultivo de café, indicando que la mayor abundancia y densidad de grupos taxonómicos de macrofauna está influenciado por el porcentaje alto e intermedio de materia orgánica. Siendo Formicidae el más abundante, seguido de Isoptera y Oligochaeta, teniendo efectos directos sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas.

### **Escala local**

Sanchez (2017) en su estudio evaluó la asociación de la densidad y biomasa con las propiedades físico-químicas del suelo en 4 sistemas de uso: (1) plantación de monocultivo con sihiringa, (2) bosque protegido, (3) sistema agroforestal y (4) sitio con cobertura de pasto brachiaria, entre la temporada diciembre–mayo. indicando que la densidad de macrofauna tuvo mayor representatividad en el sistema agroforestal, mientras que en el sitio de cobertura de pasto hubo mayor cantidad de biomasa y diversidad de macrofauna, siendo influenciados directamente por el contenido de potasio y por la Capacidad de intercambio Catiónico del suelo (CIC).

Ccoycca (2018) evaluó la asociación de densidad, biomasa, riqueza y diversidad de la macrofauna con las características físicas y químicas del suelo y la vegetación, en sistemas agroforestales, indicando que los órdenes con mayor densidad fueron haplotaxidas, hymenoptera, isóptera y coleóptera, mientras que para la biomasa solo haploxida y coleóptera, siendo los órdenes más importantes; la variación de las propiedades del suelo no influenciaron en las variables evaluadas, pero se encontró una relación directa de la macrofauna con la abundancia de cacao y especies maderables incrementando la biomasa y diversidad.

### **2.1.3. Estudios de macrofauna edáfica como indicadores biológicos**

#### **Escala internacional**

Duran-Bautista et al. (2020) identificaron especies de termitas indicadoras para los diferentes sistemas de uso de tierra en áreas deforestadas en la

amazonia colombiana y peruana, su metodología consistió en recolectar termitas en diferentes granjas de ambos países (12 Colombia y 26 Perú) en 190 puntos de muestreo (cinco por granja), midiéndose en cada punto la fertilidad química, las funciones hidrológicas del suelo, la macroagregación del suelo y las comunidades de macrofauna bajo ocho tipos de cobertura vegetal: (1) bosque natural, (2) vegetación secundaria, (3) sistemas agroforestales, (4) sistemas silvipastoriles, (5 y 6) cultivos perennes y anuales, (7 y 8) pastos degradados y boscosos. Se buscaron especies indicadoras de termitas para los servicios del ecosistema del suelo utilizando el método del indicador de valor índice (IndVal). Los resultados indican que 14 de 48 especies identificadas eran indicadoras de los servicios del ecosistema del suelo, el uso de la tierra generó cambios en la composición de especies, principalmente con termitas humívoras y afectó los servicios del ecosistema del suelo. La ausencia o presencia de las termitas puede indicar oportunamente los efectos negativos de ciertas prácticas de manejo.

Gedoz et al. (2021) compararon los impactos de la perturbación en la comunidad de invertebrados edáficos tanto en un área de pastizales y un área de bosque nativo, en estaciones de verano e invierno. Indicando que se recolectó 20 órdenes, las cuales collembola, hymenoptera, díptera y hemiptera tuvieron la mayor abundancia. La influencia estacional resultó significativo, el impacto de la comunidad de invertebrados edáficos mostró que el bosque nativo tiene mayor complejidad y estabilidad estructural.

Kitamura et al. (2020) evaluaron la macrofauna edáfica de un área en recuperación con la siembra de diferentes tipos de cobertura vegetal: (1) suelo desnudo, (2) vegetación nativa del cerrado, (3) especies del género *Astronium*, (4) + *Canavalia*, (5) *Astronium* + *Raphanus*, (6) *Astronium* + *Brachiaria* + lodos de depuradora). Los resultados indican que en la cobertura vegetal con *Astronium* + *Brachiaria* + lodos de depuradora aumentó la abundancia de la macrofauna edáfica aproximadamente 4 a 6 veces más que los otros tipos de cobertura vegetal después de tres años de evaluación, lo

que indica que es el tratamiento más adecuado para la recuperación de suelos degradados.

Cabrera (2012) revela que las hormigas y lombrices de tierra sirven como indicadores biológicos del estado de perturbación del suelo.

Baretta, Brown y Cardoso (2010) evaluaron la macrofauna edáfica como indicadores de calidad del suelo en áreas con *Araucaria angustifolia* naturales y reforestadas, los resultados del estudio indican que los grupos diplopoda, chilopoda, isóptera e araneae pueden ser usada como indicadora de calidad de suelo.

Pinzón et al. (2015) realizaron un estudio sobre “la macrofauna del suelo como indicadora de degradación de bosques ribereños en la amazonia oriental brasilera” indican que el 45,6 % de la macrofauna está relacionada de manera indirecta a la degradación forestal. Los grupos caracoles (Gastropoda y Cuvir), opiliones (Opelionida, Sundavall), lombrices (Oligochaeta, Lamarck) y cochinillas (Isopoda, Latreille) se asocian estrechamente con las áreas conservadas, al igual que los grupos herbívoros y saprófagos, los cuales mostraron particularidad por los bosques maduros. La ausencia de estos grupos indica un fuerte efecto causado por la destrucción de bosques ribereños.

### **Escala nacional**

Lazo y Aguirre (2018) evaluaron cuatro sistemas productivos: (1) agricultura orgánica, (2) agricultura convencional, (3) sistema pastizal, (4) sistema forestal a dos niveles superficiales: 0 a 30 cm y 30 a 60 cm de profundidad con el objetivo de determinar el efecto del manejo agronómico en la densidad y diversidad de lombrices de tierras, encontrándose diferencias significativas sobre la densidad de lombrices de tierra en el nivel superficial de 0 a 30 cm, destacando el sistema pastizal con 170,67 ind/m<sup>2</sup>, mientras que en el nivel superficial de 30 a 60 cm no hubo diferencias significativas en la densidad. Sin

embargo, se concluyó que el manejo agronómico si influye en la calidad del suelo.

## **2.2. Marco teórico**

### **2.2.2. Características de la macrofauna edáfica**

Son organismos cuyo diámetro corporal es mayor a 2 mm (Linden et al. 1994 ; Lee y Foster 1991), se caracterizan porque están presentes en escalas de tiempo y espacio más amplios que los grupos de menor tamaño. Destacando por intervenir en 5 procesos ecosistémicos; (1) ciclos de la energía, (2) de nutrientes, (3) hidrológico, (4) proceso de sucesión de vegetación y (5) la regulación biótica (Linden et al. 1994), favoreciendo la resiliencia y resistencia de suelo (Lavelle et al. 2006).

### **2.2.3. Importancia de la macrofauna**

La importancia de macrofauna como indicadores biológicos para evaluar la calidad del suelo tiene inicios desde hace 2 décadas (Stork y Eggleton 1992 ; Paoletti et al. 1991 ; Linden et al. 1994) a consecuencia del creciente interés de la agricultura sostenible, la contaminación y la restauración de suelos (Linden et al. 1994).

La macrofauna es considerada uno de los grupos más prestigioso del suelo; tienen el mayor efecto directo sobre las propiedades funcionales del suelo (Lee y Foster 1991). A continuación, se detalla las propiedades de la fauna del suelo para su uso como indicadores de la calidad del suelo, son:

#### **1. Organismos y poblaciones**

##### **Individuales**

Comportamiento, morfología y fisiología

##### **Poblaciones**

Números y biomasa

Distribución por edades

Tasas de crecimiento, mortalidad y reproducción

#### **2. Comunidades**

##### **Grupos funcionales**

Gremios (por ejemplo, excavadores frente a no excavadores)

### **Grupos tróficos**

Cadenas y redes alimentarias (microbívoros, depredadores, etc.)

### **Biodiversidad**

Riqueza de especies, dominancia

Especies clave

## **3. Procesos biológicos**

### **Bioacumulación**

Metales pesados y contaminantes orgánicos

### **Descomposición**

Fragmentación de la materia orgánica

Mineralización de C y nutrientes

### **Modificación de la estructura del suelo**

Formación de madrigueras y bioporos

Deposición fecal y agregación del suelo

Mezcla y redistribución de la materia orgánica

### **2.2.4. Grupos funcionales de la macrofauna edáfica**

El rol funcional de la macrofauna edáfica se debe en gran parte a la eficacia de su sistema digestivo, la relación con la microflora del suelo y la abundancia de las estructuras biológicas que producen en el suelo (Lavelle 1997; 1996).

Los macroinvertebrados tienen una estructura basada en la predominancia de ingenieros edáficos y detritívoros y menores poblaciones de depredadores, herbívoros, debido a la colonización tardía de estos últimos (Masin et al. 2017 ; Gómez, Godoy y Coronel 2016); la actividad de los diferentes grupos regula los procesos edáficos del ecosistema (Cabrera 2012).

Partiendo desde el punto de vista funcional Lavelle (1997) y Zerbino et al. (2008) agrupan a la macrofauna en cuatro grupos:

- **Ingenieros del suelo**

Son organismos que son capaces de excavar eficientemente el suelo y producir estructuras organominerales con gran variedad de poros. El tamaño de estos macroinvertebrados permite el desarrollo de anisosimbiosis

relacionadas con la micloflora, siendo importantes por colaborar con los procesos básicos del suelo como la mineralización de C y N, fijación de N, infiltración de agua y aire (Lavelle 1996).

- **Detritívoro**

Son organismos cuya función es a nivel superficial del suelo, se alimentan de la hojarasca ayudando en la fragmentación e inicio del proceso de descomposición, incrementando la superficie de exposición para la microflora, dentro de este grupo se encuentran: los milpiés (Spiobolida, Polydesmida y otros), cochinillas (Isopoda) y caracoles (Archaeogastropoda) (Cabrera, Robaina y Ponce de Leon 2011).

- **Depredadores**

Son organismos que habitan en el suelo, consideradas como una parte sustancial al controlar la estructura de la trama trófica (Bardgett 2002), dentro de este grupo se encuentran: arácnidos (Araneae, Opiliones, Pseudoscorpionida) y ciempiés (Geophilomorpha, Scolopendromorpha).

- **Herbívoros**

Son organismos que se alimentan de la producción primaria neta de las partes subterráneas de las plantas (Masters 2008), los grupos más importantes son: coleópteros (Coleoptera), hemípteros (Hemiptera) y otros órdenes de insectos.

### **2.2.5. La macrofauna y su relación con el suelo**

Los macroinvertebrados edáficos se consideran los más sobresalientes, teniendo el mayor potencial de efectos directos sobre las propiedades funcionales del suelo (Lee y Foster 1991).

La función de la macrofauna del suelo es triturar y distribuir los residuos orgánicos en el perfil edáfico, aumentando la disponibilidad y superficie de sustratos para la actividad microbiana (Doran et al. 1994).

El tamaño de la fauna del suelo y su modo de vida, especialmente su movilidad y sus estrategias de alimentación, determinan su influencia en los procesos del suelo (Doran et al. 1994), ver figura 1.

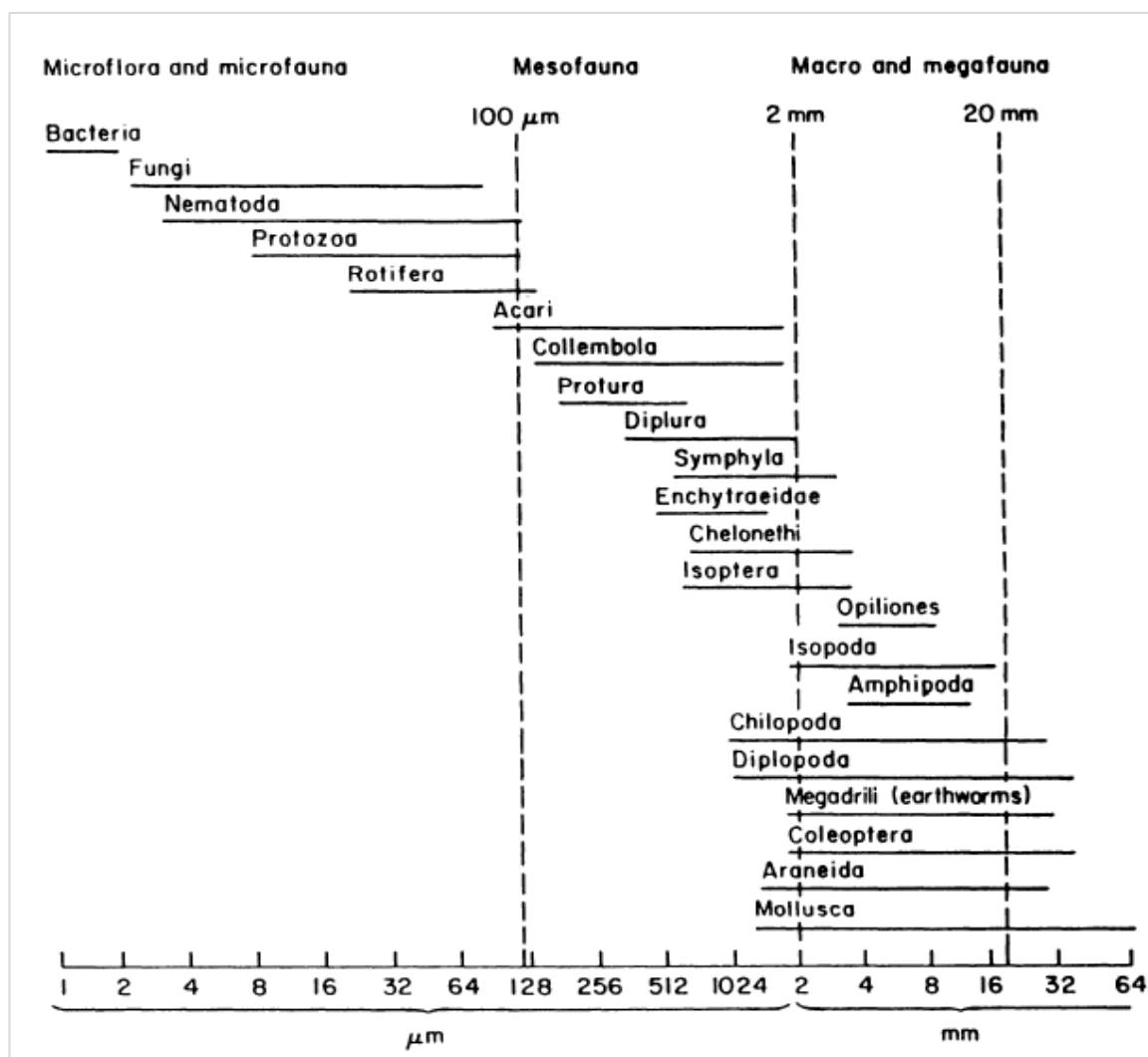


**Figura 1.** Clasificación del tamaño de los organismos del suelo según la anchura del cuerpo (Swift, Heal y Anderson 1979).

Entre estos organismos destacan las termitas (Isopteras), las hormigas (Formicidae), los isópodos, anfípodos, ciempiés (Chilopoda), milpiés (Diplopoda), insectos adultos y larvas (Insecta), las lombrices de tierra (Megadrili), caracoles y babosas (Doran et al. 1994). Siendo el grupo de las termitas, hormigas y lombrices encargadas de transformar principalmente la estructura del suelo mediante la formación de macroporos y agregados (Lee y Foster 1991).

En general, la macrofauna edáfica influye en la mayoría de los procesos funcionales del suelo, promoviendo el desarrollo de la vegetación, distribuir el agua y mejorar la contaminación ambiental (Doran et al. 1994).

### 2.2.6. ¿Qué son las especies indicadoras de hábitat?

Para Dufrêne y Legendre (1997) son los individuos más característicos de cada grupo y se encuentran principalmente en un solo grupo y están presentes en la mayoría de sitios pertenecientes a ese grupo.

Por otro lado, Lindenmayer et al. (2002) indican que son especies sensibles capaz de emitir una señal de alerta cuando se producen cambios ambientales, como los cambios climáticos o los cambios en la gestión de los incendios.

### 2.2.7. Clasificación de especies indicadoras

McGeoch y Chown (1998) ; McGeoch, Van Rensburg y Botes (2002) clasifican a las especies indicadoras en tres categorías:

- **Indicadoras ambientales:** Son especies sensibles a los cambios ambientales, detectando de forma directa el estado biótico o abiótico del ambiente.
- **Indicadoras ecológicas:** Son especies que se ven afectadas por cambios ambientales en su hábitat, comunidad o ecosistema.
- **Indicadoras de biodiversidad:** Son especies claves en señalar áreas de alta riqueza de especies (Caro y O'Doherty 1999).

### 2.2.8. Método frecuente para seleccionar especies indicadoras del hábitat

La incertidumbre asociada al uso de números reducidos de indicadores y la ecuanimidad con que son escogidos (Soberón, Rodríguez y Vázquez-Domínguez 2000), lleva a la necesidad de optar por métodos cuantitativos específicos para elegir especies indicadores (Martín-Regalado 2019).

- **Método del Valor Indicador (IndVal):** “Se basa en la exclusividad a un hábitat determinado y la fidelidad o la frecuencia de ocurrencia dentro de un mismo hábitat, ambos medidos de forma independiente para cada taxón y se expresa con un valor porcentual” (Carmona et al. 2016, pag. 142).

### **2.2.9. Indicadores de calidad de suelo**

Larson y Pierce (1991) ; Doran et al. (1994) desarrollaron una lista de características básicas del suelo que cumplen con mucho de los requisitos para ser indicadores de la calidad del suelo, estos son:

#### **a) Indicadores químicos**

Nortcliff (2002) ; Bautista et al. (2004) ; García, Ramírez y Sánchez (2012) mencionan los parámetros más importantes, entre ellos se encuentran el pH, salinidad, estado de aireación, contenido de materia orgánica, estado de nutrientes de la planta, la capacidad de intercambio catiónico, disponibilidad de nutrientes, carbono orgánico total, nitrógeno total y la capacidad del suelo para amortiguar el cambio.

#### **b) Indicadores físicos**

Es prioritario evaluar las características físicas, porque su capacidad de mejorar suele ser lenta (Singer y Ewing 2000). Entre las características más relevantes se encuentran la densidad aparente, la estructura, la infiltración, la textura del suelo, la compactación de suelo, la estabilidad de agregados, la resistencia y la profundidad del suelo (SQI 1996 ; Karlen et al. 1997 ; Nortcliff 2002 ; García, Ramírez y Sánchez 2012).

#### **c) Indicadores biológicos**

Aunque los indicadores físicos y químicos son los principales indicadores para evaluar la calidad del suelo (Bone et al. 2014 ; Pulido et al. 2015) los indicadores biológicos son los más adecuados para evaluar suelos perturbados, gestión de tierras y degradación de suelos.

Entre los indicadores más usados se encuentran la biomasa microbiana del suelo, la actividad de la biomasa, proporciones de hongos, las comunidades de nematodos, las bacterias gran negativa y gran positiva, la tasa de N/C de la biomasa, la abundancia y subproductos de los macro invertebrados (Karlen et al. 1997 ; SQI 1996 ; Nortcliff 2002 ; Shao et al. 2008 ; Bautista et al. 2004 ; Paz-Ferreiro y Fu 2016).

### 2.2.10. Principales componentes de la calidad de suelo

Los principales componentes de la calidad del suelo se presentan en la figura 2.

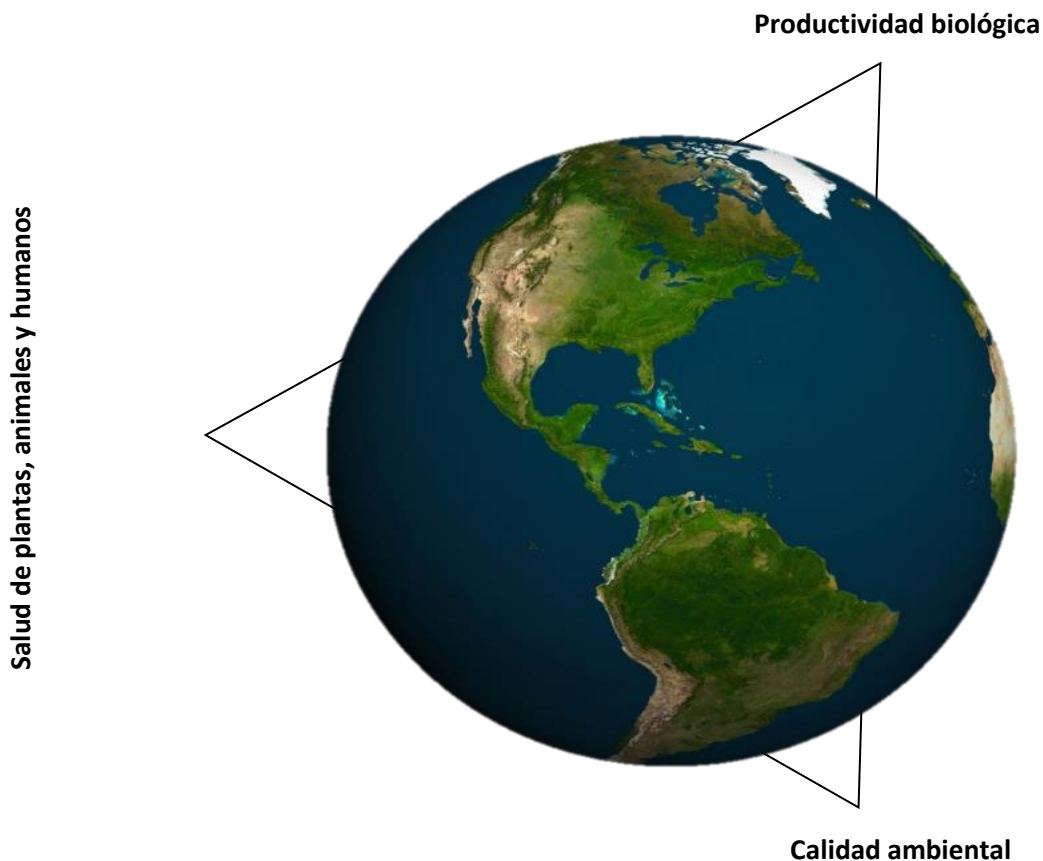


**Figura 2.** Principales componentes de la calidad de suelo (Doran y Parkin 1994).

### 2.2.11. Condiciones que deben cumplir los indicadores de la calidad del suelo

Para que las propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo se consideren indicadores de la calidad del suelo, deben cumplir las siguientes condiciones descritas por Masera, Astier y López Ridaura (1999): (1) ser fácil de reconocer, medir y entender, (2) ser integradores, (3) ser apropiados al nivel de análisis y sistema estudiado, (4) centrarse en aspectos claros y prácticos, (5) ser preferentemente adaptables a un rango de ecosistemas y condiciones, (6) reflejar el atributo de sostenibilidad que se quiere evaluar y (7) permitir cambios y diferencias entre los sistemas.

No obstante, Ramírez (2004) indica que: (1) deben ser sensibles a los cambios que sufre el suelo, tanto en los procesos de recuperación y degradación, (2) debe haber una alta asociación con los procesos del ecosistema, (3) deben integrar los procesos químicos, biológicos y físicos del suelo, y (4) deben ser relativamente fáciles de medir en condiciones de campo.

### **2.2.12. Medición de la diversidad**

Los índices de diversidad se usan para dar idea de la diversidad de un sitio (Jost 2006), permiten reflejar la estructura de una comunidad basándose en su equidad y la riqueza específica.

Basándonos en la clasificación de Moreno (2001), a continuación, se describe los índices para medir la diversidad.

- **Riqueza de especie:** Es el índice más usado para describir una comunidad, resultando relevante para comparar la mayor riqueza de una comunidad respecto a otra (Gaston 1996 ; Gotelli y Colwell 2011 ; López-Mejía et al. 2017).
- **Índice de Shannon-Wiener (H')**: “Mide el grado medio de incertidumbre en predecir a que pertenecerá un individuo escogido al azar de una colección” (Magurran 1998, pág. 34).
- **Índice de Simpson:** “Mide la probabilidad de que dos individuos de la misma comunidad tomados al azar pertenezcan a la misma especie” (Simpson 1949, pág. 668).

### **2.2.13. Sucesión ecológica**

Según Walker y Alberstadt (1975) la sucesión ecológica involucra cambios de una comunidad a lo largo del tiempo a causa de una perturbación natural o antrópica (Chang y Turner 2019 ; Walker et al. 2010).

Para Bazzaz (1979) la sucesión es un proceso de colonización continua y extinción en el sitio por poblaciones de especies.

Actualmente, la teoría de sucesión ecológica ha cambiado, con los frecuentes estudios sobre las plantas, las microbianas, rasgos funcionales y etapas retrogradadas del desarrollo del ecosistema (Chang y Turner 2019), ejerciendo

un papel importante en la teoría y aplicación ecológicas modernas debido en gran parte a los cambios globales (Chang y Turner 2019), como ejemplo tenemos:

- Cambio de uso de la tierra y fragmentación del hábitat, afectando de forma directa la dispersión, el tamaño y los efectos de prioridad de la comunidad de especies existentes (Damschen et al. 2008 ; De Meester et al. 2016 ; Fukami 2015).
- Cambios en las condiciones abióticas, afectando el filtrado ambiental, la fuerza, la dirección y la retroalimentación planta-suelo, con posibles implicaciones para el progreso comunitario (Blois et al. 2013 ; Ettinger y HilleRisLambers 2013 ; Härdtle et al. 2006).

Por consiguiente, los estudios de sucesión permiten entender las respuestas de los ecosistemas frente al cambio global actual (Chang y Turner 2019).

#### **2.2.14. Sucesión primaria**

La sucesión primaria es el cambio secuencial de la composición de especies u otras características del ecosistema sin legado biológico (Walker y del Moral 2002). La sucesión primaria ofrece un modelo clave para proyectos de restauración en áreas con perturbación severa (Luken 1990).

#### **2.2.15. Sucesión secundaria**

“Suele ser el resultado de la competencia interespecífica, con especies pioneras que a menudo superan a las especies posteriores en las aperturas, pero ellas mismas producen un entorno en el que las especies posteriores son competitivamente superiores” (Horn 1974, pág. 25).

#### **2.2.16. Cronosecuencia**

Muchos ecólogos se aferran al desafío de como estudiar los procesos sucesionales y el desarrollo del suelo (Walker et al. 2010). La cronosecuencia es útil para el estudio de sucesión vegetal y desarrollo del suelo que ocurren entre sitios con escalas de tiempo siguiendo una misma trayectoria, siendo a veces su uso de forma independiente entre comunidades vegetales y suelos (Walker et al. 2010).

## **2.3. Definición de términos**

### **2.4.1. Sucesión:**

Definido por Clements (1916) como un proceso sinecológico de acontecimientos graduales y recurrentes que tienden a devolver el equilibrio a las comunidades.

### **2.4.2. Sucesión secundaria:**

“Es el proceso de restablecimiento de un facsímil razonable de la comunidad original después de una perturbación temporal” (Horn 1974, pág. 25).

### **2.4.3. Macrofauna edáfica:**

“Organismos cuyo tamaño exceda de 2 a 20 mm” (Menta 2012, pág. 61).

### **2.4.4. Diversidad biológica:**

“Es la variedad y abundancia de especies en una unidad de estudio definida” (Magurran 1998, pág. 6).

### **2.4.5. Calidad de suelo:**

Mantener o mejorar la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y mantener la salud humana y el hábitat dentro de los límites de un ecosistema natural o gestionado (Karlen et al. 1997).

### **2.4.6. Cronosecuencia:**

Es un conjunto de sitios formados por el mismo material parental o sustrato que difiere en el tiempo desde que se formaron (Walker et al. 2010).

### **2.4.7. Sucesión ecológica:**

La sucesión primaria es el término utilizado para describir el cambio gradual en la composición y/o estructura de las especies que se produce tras una perturbación importante que elimina la mayor parte de la materia orgánica o una perturbación menor que deja algún legado biológico (Walker et al. 2010).

## **CAPITULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN**

### **3.1. Tipo de estudio**

El presente estudio es de tipo descriptivo y correlacional, porque describe un fenómeno de la realidad y muestra la relación entre variables (Pino-Gotuzzo 2018).

Según su finalidad es básica, porque busca tener ampliar nuevos conocimientos para la recuperación de suelos degradados por minería mediante el estudio de la macrofauna edáfica.

Según su carácter de medida es cuantitativa, porque las variables son medibles en la realidad.

### **3.2. Diseño del estudio**

La investigación es no experimental, porque no hay una manipulación de las variables (Andia 2017), se analizaron los hechos (parcelas con regeneración) después de sus ocurrencias (actividades mineras) (Carrasco-Díaz 2008). Es del tipo transversal, porque se evaluó en un tiempo determinado (Carrasco-Díaz 2008).

### **3.3. Población y muestra**

#### **3.3.1. Población**

La población estuvo conformada por todos los sitios (parcelas) con regeneración natural y diferentes años de abandono en la comunidad nativa de San Jacinto, Provincia de Tambopata-Madre de Dios.

#### **3.3.2. Muestra**

El muestreo empleado fue de tipo no probabilístico, esto quiere decir que la muestras no dependieron de la probabilidad sino más bien por las decisiones de los investigadores (Herández-Sampieri, Fernández y Baptista 2014). La técnica de muestreo utilizado fue por conveniencia (Otzen y Manterola 2017).

Este muestreo, se fundamenta porque las áreas abandonadas (parcelas) se tomaron en consideración de acuerdo a la accesibilidad del lugar y las características del área.

### 3.4. Métodos y técnicas

#### 3.4.1. Lugar de estudio

El lugar de estudio está ubicado en la Comunidad Nativa de San Jacinto, geográficamente se ubica en dirección sur-oriental de la amazonia peruana. Políticamente está ubicado en la región de Madre de Dios, Distrito de Tambopata y Provincia de Tambopata (Figura 3).

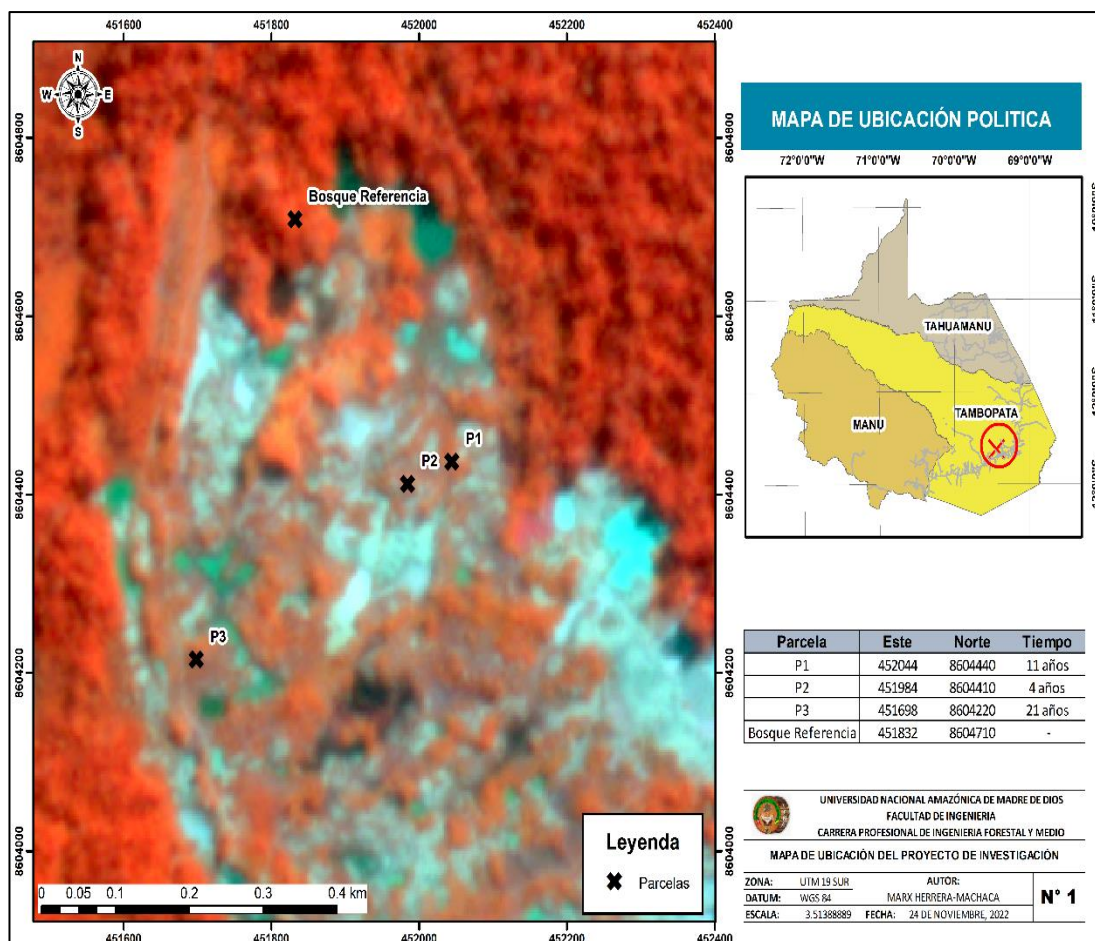


Figura 3. Mapa de ubicación (Imagen satelital PlanetScope del año 2021).

#### 3.4.2. Clima

Madre de Dios es categorizado por el tipo de clima 5 que corresponde a muy lluvioso a lluvioso y cálido, con humedad todo el año (SENAMHI 2020).

### 3.4.3. Muestreo de la vegetación

Se identifico tres parcelas con diferentes tiempos de abandono y un bosque de referencia con dimensiones de 10m x 25 m y se midió e identifico a todos los individuos con un DAP superior a 1 cm (Figura 4). La ubicación de los sitios abandonados (parcelas) fue por criterio de accesibilidad y característica del sitio.

Se utilizo una cinta diamétrica para medir el diámetro de las especies, y una tijera telescópica para recolección botánica siempre y cuando no se tuviera una identificación a nivel de especie.

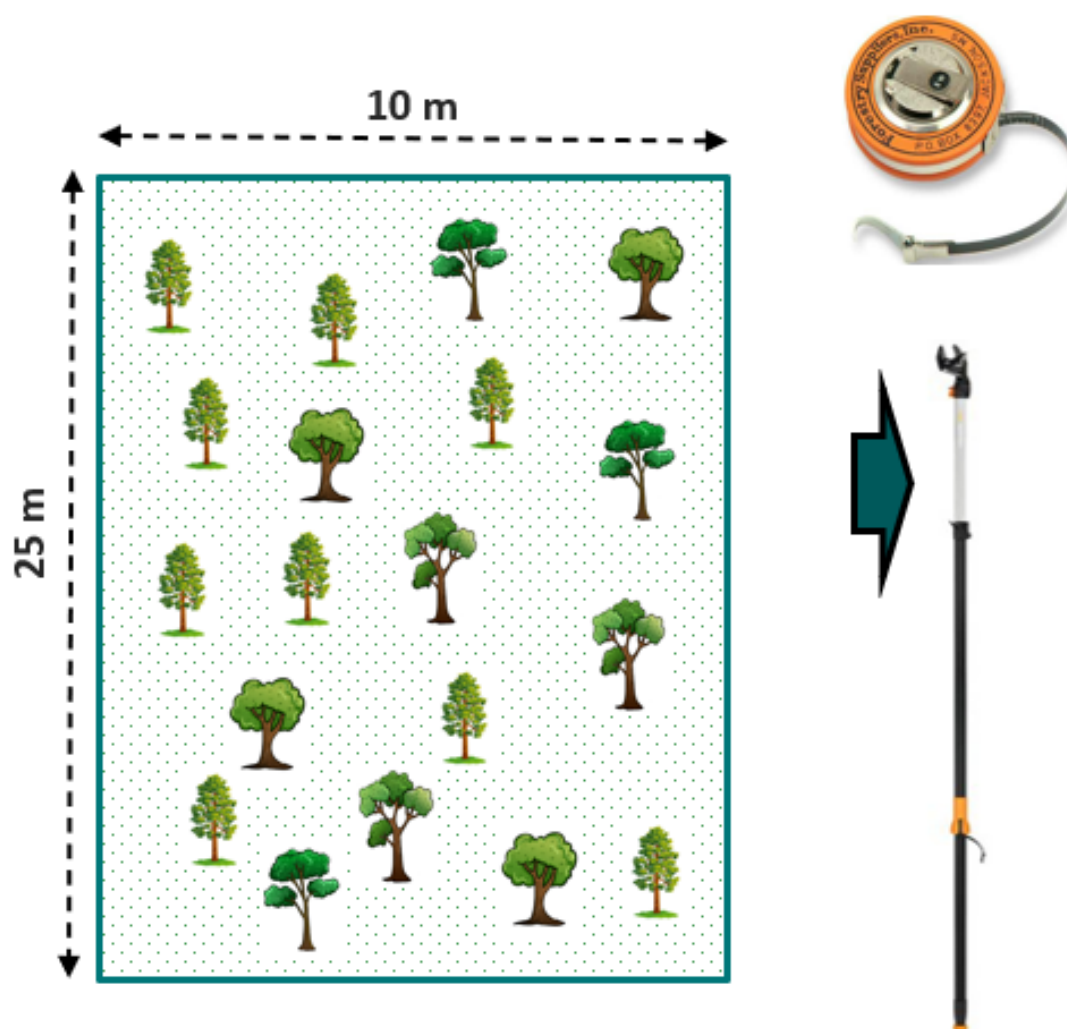


Figura 4. Muestreo de la vegetación en áreas con regeneración natural.

### 3.4.4. Técnicas de muestreo de la macrofauna edáfica

#### a) Muestreo, recolección y preservación de macrofauna

Se utilizó una versión modificada de la metodología propuesta por el programa de Investigación Internacional “Tropical Soil Biology and Fertility” (TSBF) (Anderson y Ingram 1993), mediante el estudio de monolitos de suelo, el cual se dividió en 3 estratos (hojarasca, 0 a 10 cm y 10 a 20 cm del suelo).

Se utilizó un transecto lineal por cada parcela con regeneración natural (parcela) dentro de cada transecto se ubicó 4 monolitos a cada 5 metros con distancia equidistantes (Figura 5).

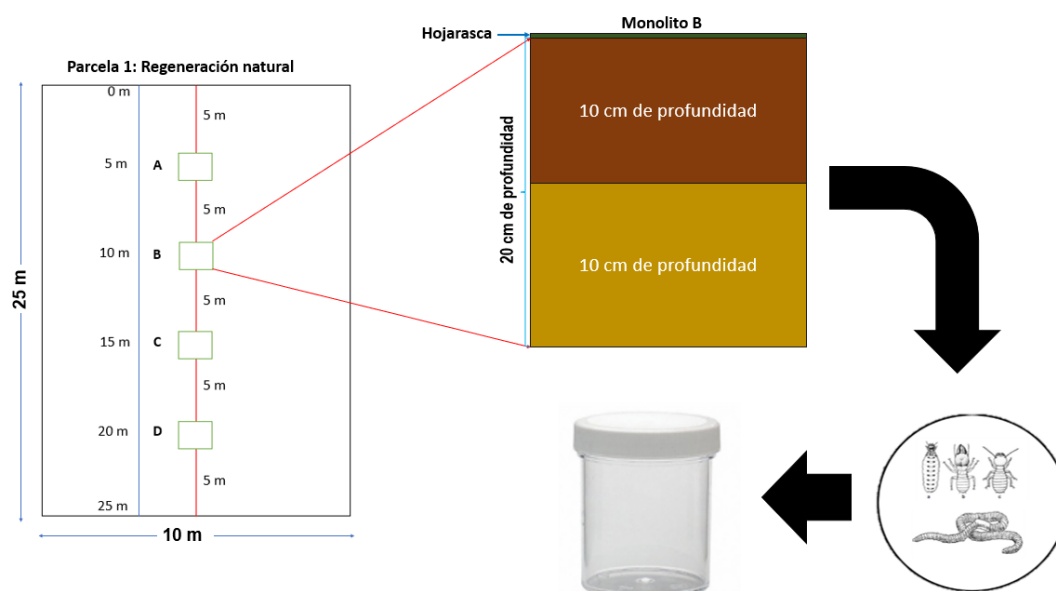


**Figura 5.** Pasos a seguir para el muestreo, recolección preservación de la macrofauna edáfica *in situ*, según la metodología de “Biología y Fertilidad de los Suelos Tropicales (TSBF). Fuente: (Anderson y Ingram 1993).

Una vez recolectado se procedió a depositar los macroinvertebrados extraídos minuciosamente del suelo, en pomos codificados con alcohol al 96 % para su posterior identificación en laboratorio.

#### b) Identificación de macrofauna edáfica

Para la identificación se solicitó la ayuda de un especialista en entomología, el cual identificó tomando en cuenta solo al nivel taxonómico “orden” para todos los individuos de macroinvertebrados.

### 3.4.5. Composición funcional de la macrofauna edáfica

Se determinó la composición funcional separando en grupos de acuerdo con Lavelle (1997) y Zerbino et al. (2008) en “detritívoros, herbívoros, depredadores e ingenieros edáficos y se determinaron la abundancia de cada grupo funcional” para cada uno de los sitios con distinto tiempo de abandono.

### 3.4.6. Determinación de las características físicas y químicas del suelo

Se realizó el muestreo siguiendo la Guía para el muestreo del Suelo (ver figura 6), recomendada por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM 2014), se tomara cuatro submuestras, de aproximadamente 0.5 kg por cada sitio haciendo un total de 16 submuestras.

Posterior al muestreo, se particiono las muestras compuestas de cada sitio, para luego ser analizadas por el laboratorio de suelos del Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana-MDD.



**Figura 6.** Metodología a emplear en el muestreo de suelos, considerando la guía para el muestreo de suelos LFU-MERKBLANTT (2010), modificado por ( Ministerio del Ambiente 2014).

### 3.4.7. Determinación de los índices de diversidad

#### ▪ Índice de Shannon – Wiener

“Expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies de la muestra” (Magurran 1988, pag. 34).

El índice de Shannon se calcula:

$$H' = - \sum p_i \times \ln p_i$$

Donde:

Pi: es la abundancia relativa de la especie i, es decir la razón del número de individuos de la i-ésima especie (ni) entre el número total de individuos (N)

### ▪ Índice de dominancia de Simpson

Se conoce como una medida de concentración y se refiere a la probabilidad de extraer individuos de una misma especie.

$$D = \frac{\sum(n_i(n_i - 1))}{(N(N - 1))}$$

Donde:

n: Número de individuos de las especies i

N: Número total de individuos

### 3.4.8. Método del valor del indicador (indVal)

Se determinara los taxones indicadores aplicando el metodo IndVal propuesto por Dufrêne y Legendre (1997) de la siguiente forma:

$$\text{IndVal}_{(\text{Sitio } k, \text{ Especie } j)} = A_{kj} \times B_{kj} \times 100$$

Donde:

**Especificidad ( $A_{kj}$ ):**  $N \text{ individuos}_{kj} / N \text{ individuos}_k$ , se basa exclusivamente a un hábitat particular.

**Fidelidad ( $B_{kj}$ ):**  $N \text{ sitios }_{kj} / N \text{ sitios}_j$ , es la frecuencia de ocurrencia dentro del mismo hábitat.

Ambos parámetros son medidos de manera independiente para cada especie y expresados como un porcentaje.

## 3.5. Tratamiento de los datos

### 3.5.1. Manejo de base de dato

La información recopilada en campo, fueron ordenados, filtrados y almacenados en la hoja de cálculo de Microsoft Excel 2016, para luego ser analizado en softwares estadísticos como: Past 4,03, Rstudio y PRIMER 7.

### 3.5.2. Análisis descriptivo y exploratorio

Para el análisis descriptivo y exploratorio de las variables de estudio se empleó el software Past 4,03, mediante el cual se verificará los supuestos paramétricos de los métodos estadísticos a ser aplicados.

#### Para los índices de diversidad

Se empleará el software Past 4,03 para determinar los índices de diversidad: Shannon – Wiener y Simpson para cada sitio.

### **Para calcular las especies de macrofauna indicadoras de cada sitio**

Se utilizó el entorno de desarrollo integrado (IDE) Rstudio del software R, mediante la función “IndVal” del paquete *indicspecies* (De Cáceres 2020).

### **3.5.3. Análisis inferencial**

Posterior al análisis descriptivo-exploratorio, se procedió a determinar las variaciones de la biomasa y abundancia, empleando los métodos estadísticos de análisis de varianza (Paramétrico) o Kruskal-Wallis (No paramétrico) de las comunidades de macrofauna del suelo entre sitios y entre grupos funcionales con un nivel de significancia del 5%, en caso de existir variación entre sitios y grupos funcionales, se procederá a realizar una prueba Post Hoc mediante la prueba de Tukey o Mann-Whitney con ajuste de Bonferroni, Software estadístico a utilizar Rstudio.

Se realizó análisis de correlación entre las características físicas y químicas de los suelos y la vegetación con la riqueza y biomasa de la macrofauna. Para evaluar la influencia de las variables edáfica en la composición de macrofauna del suelo se utilizó el Análisis de varianza multivariante permutacional (PERMANOVA), para saber que taxones hacen que la prueba de PERMANOVA diera significativo, se aplicó la prueba SIMPER. Todos estos análisis se realizaron utilizando el programa estadístico PRIMER v7. Se empleo Tablas para resumir los análisis estadísticos aplicados en el presente estudio y Figuras para representarlos visualmente.

## CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. Abundancia, riqueza, diversidad y biomasa de la macrofauna

#### 4.1.1. Abundancia, riqueza y diversidad de macrofauna en una cronosecuencia post-minería

Se registro un total de 583 individuos de macrofauna a lo largo de una cronosecuencia post-minería pertenecientes a 16 grupos taxonómicos. Se encontró una mayor riqueza taxonómicos en la parcela de 11 años de abandono. Las ordenes Hymenoptera, Oligochetos, coleópteros, Polyxenida y gasterópoda estuvieron presentes en todas las parcelas con diferentes tiempos de abandono. El índice de Shannon nos indica que hubo mayor diversidad equitativa de macrofauna en la parcela 4 años y 21 años de abandono. Mientras que el índice de Simpson nos indica que hubo mayor dominancia de diversidad en la parcela de 11 años de abandono (Tabla 2).

Estos registros son inferiores a los reportados por Machado et al. (2018) quienes encontraron 1225 individuos en áreas minadas de carbón. Asimismo, también menciona que hymenoptera posiblemente tenga una influencia directa con la baja diversidad de grupos taxonómicos, al ser más abundante.

Tabla 2. Abundancia, riqueza, diversidad taxonómica de macrofauna y frecuencia relativa (Fr %) en una cronosecuencia post-minería aurífera y bosque de referencia.

| Orden       | Parcelas con diferentes años de abandono |         |         |       |      |        | Fr%   |
|-------------|------------------------------------------|---------|---------|-------|------|--------|-------|
|             | 4 años                                   | 11 años | 21 años | Total | Fr%  | Bosque |       |
| Hymenoptera | 43                                       | 394     | 14      | 451   | 77,4 | 62     | 48,82 |
| Oligochetos | 7                                        | 18      | 14      | 39    | 6,7  | 7      | 5,51  |
| Coleoptero  | 6                                        | 5       | 4       | 15    | 2,6  | 21     | 16,54 |
| Isopoda     | 0                                        | 5       | 23      | 28    | 4,8  | 0      | 0,00  |
| Isoptera    | 1                                        | 0       | 0       | 1     | 0,2  | 16     | 12,60 |
| Gasteropoda | 1                                        | 4       | 3       | 8     | 1,4  | 1      | 0,79  |
| Symphyla    | 0                                        | 1       | 0       | 1     | 0,2  | 6      | 4,72  |
| Aranae      | 0                                        | 4       | 0       | 4     | 0,7  | 1      | 0,79  |

Fr%: Frecuencia relativa

**Continuación de la Tabla 2.** Abundancia, riqueza, diversidad taxonómica de macrofauna y frecuencia relativa (Fr %) en una cronosecuencia post-minería aurífera y bosque de referencia

| Orden              | Parcelas con diferentes años de abandono |         |         |       |     |        | Fr%  |
|--------------------|------------------------------------------|---------|---------|-------|-----|--------|------|
|                    | 4 años                                   | 11 años | 21 años | Total | Fr% | Bosque |      |
| Hemiptera          | 0                                        | 1       | 2       | 3     | 0,5 | 1      | 0,79 |
| Blattodea          | 1                                        | 1       | 0       | 2     | 0,3 | 0      | 0,00 |
| Opiliones          | 0                                        | 2       | 0       | 2     | 0,3 | 2      | 1,57 |
| Polyxenida         | 5                                        | 5       | 14      | 24    | 4,1 | 9      | 7,09 |
| Acariformes        | 0                                        | 0       | 1       | 1     | 0,2 | 1      | 0,79 |
| Homoptera          | 0                                        | 1       | 1       | 2     | 0,3 | 0      | 0,00 |
| Pseudoescorpionida | 1                                        | 0       | 0       | 1     | 0,2 | 0      | 0,00 |
| Planaria           | 0                                        | 0       | 1       | 1     | 0,2 | 0      | 0,00 |
| Abundancia         | 65                                       | 441     | 77      |       |     | 127    | -    |
| Riqueza            | 8                                        | 12      | 10      |       |     | 11     | -    |
| Simpson            | 0,46                                     | 0,80    | 0,19    |       |     | 0,29   | -    |
| Shannon            | 1,19                                     | 0,55    | 1,84    |       |     | 1,62   | -    |

Fr%: Frecuencia relativa.

En cuanto a la frecuencia relativa, considerando el total de macrofauna encontrados a lo largo de la cronosecuencia, nos indica que hay mayor abundancia en los grupos taxonómicos de himenoptera (77,4%) y oligochetos (6,7 %). Estos grupos son importantes porque actúan en la formación y estructuración del suelo (Melo et al. 2009).

- **Abundancia y riqueza taxonómica por estratos**

Se encontró mayor abundancia de macrofauna en los primeros 10 cm de profundidad, a lo largo de la cronosecuencia post-minería. Las parcelas de 11 y 21 años fueron las que registraron mayor abundancia, siendo las ordenes más representativos himenopteras y oligochetos.

En profundidades de 20 cm, hubo mayor abundancia de macrofauna en la parcela de 11 años de abandono, siendo las ordenes con más predominancia himenopteras y oligochetos. En hojarascas hubo mayor abundancia en la parcela de 21 años de abandono, siendo himenoptera y polyxenida los más representativos.

Se encontró mayor riqueza taxonómica en la profundidad de 10 cm. Siendo más representativo en las parcelas de 11 y 21 años de abandono. Mientras que en profundidades de 20 cm fue mayor la parcela de 4 años de abandono.

En hojarasca hubo mayor riqueza taxonómica en la parcela de 21 y 4 años de abandono (Tabla 3).

Tabla 3. Abundancia y riqueza taxonómica de macrofauna del suelo por estratos.

| Orden              | Parcelas con diferentes años de abandono |       |       |         |       |       |         |       |       |
|--------------------|------------------------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
|                    | 4 años                                   |       |       | 11 años |       |       | 21 años |       |       |
|                    | Ho                                       | 10 cm | 20 cm | Ho      | 10 cm | 20 cm | Ho      | 10 cm | 20 cm |
| Hymenoptera        | 2                                        | 36    | 5     | 0       | 223   | 171   | 16      | 124   | 0     |
| Oligochetos        | 2                                        | 2     | 3     | 0       | 14    | 4     | 0       | 12    | 2     |
| Coleoptero         | 3                                        | 3     | 0     | 3       | 2     | 0     | 1       | 3     | 0     |
| Isopoda            | 0                                        | 0     | 0     | 3       | 2     | 0     | 2       | 21    | 0     |
| Isoptera           | 0                                        | 0     | 1     | 0       | 0     | 0     | 0       | 0     | 0     |
| Gasteropoda        | 0                                        | 1     | 0     | 2       | 2     | 0     | 1       | 2     | 0     |
| Symphyla           | 0                                        | 0     | 0     | 0       | 1     | 0     | 0       | 0     | 0     |
| Aranae             | 0                                        | 0     | 0     | 0       | 4     | 0     | 0       | 0     | 0     |
| Hemiptera          | 0                                        | 0     | 0     | 0       | 1     | 0     | 0       | 2     | 0     |
| Blattodea          | 1                                        | 0     | 0     | 0       | 1     | 0     | 0       | 0     | 0     |
| Opiliones          | 0                                        | 0     | 0     | 0       | 2     | 0     | 0       | 0     | 0     |
| Polyxenida         | 1                                        | 3     | 1     | 2       | 3     | 0     | 10      | 12    | 0     |
| Acari              | 0                                        | 0     | 0     | 0       | 0     | 0     | 1       | 0     | 0     |
| Homoptera          | 0                                        | 0     | 0     | 0       | 1     | 0     | 0       | 1     | 0     |
| Pseudoescorpionida | 1                                        | 0     | 0     | 0       | 0     | 0     | 0       | 0     | 0     |
| Planaria           | 0                                        | 0     | 0     | 0       | 0     | 0     | 1       | 0     | 0     |
| <b>Abundancia</b>  | 10                                       | 45    | 10    | 10      | 256   | 175   | 32      | 177   | 2     |
| <b>Riqueza</b>     | 6                                        | 5     | 4     | 4       | 12    | 2     | 7       | 8     | 1     |

H=Hojarasca; 10 = profundidad (cm); 20=profundidad (cm)

#### • Densidad de macrofauna del suelo

Se realizó la prueba no paramétrica kruskal wallis, tomando como referencia el total de hojarasca con los 10 cm de profundidad. La prueba nos indica que no hubo diferencias significativas a lo largo de la cronosecuencia comparado con el bosque de referencia ( $p$  valor  $> 0,05$ ). Sin embargo, se evidencia un patrón progresivo de la abundancia de la macrofauna a lo largo de la cronosecuencia (Figura 7). La no significancia a lo largo de la cronosecuencia, podría deberse, al proceso de desarrollo del suelo, que tarda un lapso de tiempo de siglos a milenios (Jenny 2012).

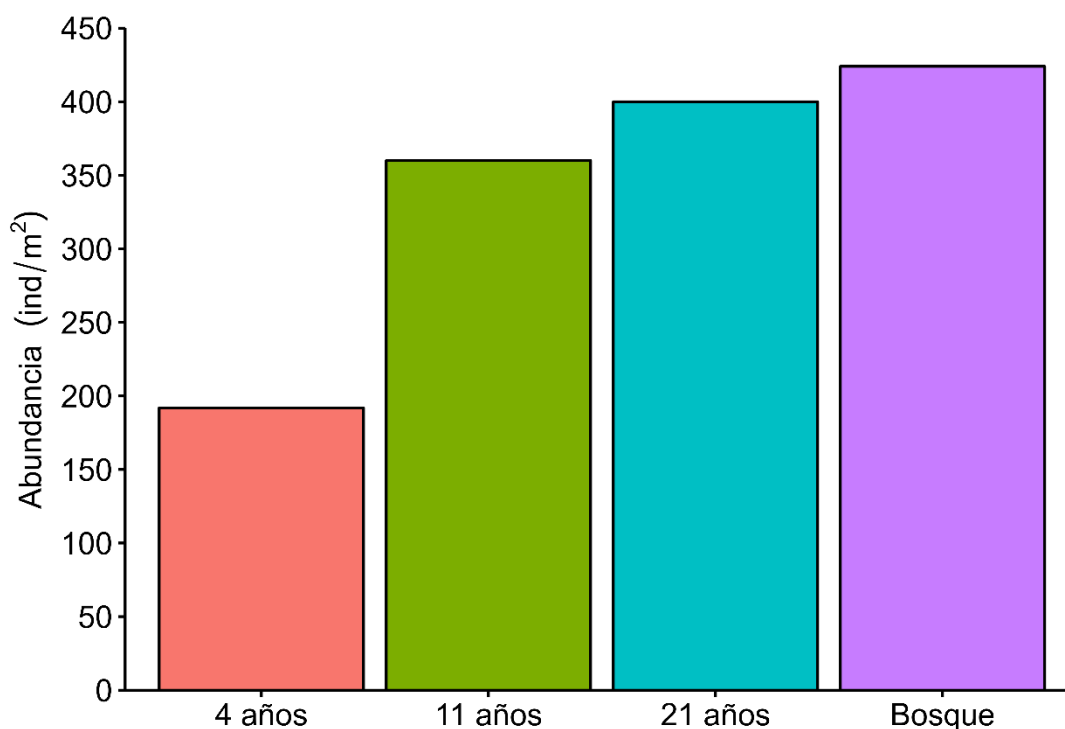


Figura 7. Abundancia (Ind.m<sup>2</sup>) de la macrofauna edáfica en a lo largo de una cronosecuencia post-minería y bosque de referencia.

La macrofauna más representativa de la parcela con tiempo de abandono de 4 años fueron himenópteros (152 ind/m<sup>2</sup>) y coleópteros (24 ind/m<sup>2</sup>) (Tabla 4). Mientras que para la parcela con 11 años de abandono fue himenóptero (892 ind/m<sup>2</sup>) y oligoquetos (56 ind/m<sup>2</sup>), similares resultados fueron reportados en sistemas silvopastoriles y pastos naturales con más de 10 años de explotación (Hernández-chávez et al. 2020). Para la parcela de 21 años de abandono fue himenóptero (560 ind/m<sup>2</sup>) y Polyxenida (88 ind/m<sup>2</sup>). Mientras que para bosque fue himenópteros (164 ind/m<sup>2</sup>) e coleóptero (76 ind/m<sup>2</sup>). Comparando los tiempos de abandono, se puede observar que existe mayor cantidad de macrofauna en los 21 años de abandono (400 Ind/m<sup>2</sup>), siendo 2.08 más veces que la parcela con 4 años de abandono. Por otra parte, el bosque tuvo mayor abundancia (Ind/m<sup>2</sup>), esto es debido a que el bosque tiene más disponibilidad de alimentos, lo que favorece a la macrofauna del suelo (Oliveira Filho, Baretta y Santos 2014).

Según de Lima et al. (2017) y Santos et al. (2016) uno de los grupos taxonómicos más frecuentes en áreas con severos impactos en el suelo, son

Hymenopteras, ya que son capaces de interactuar en diferentes funciones ecológicas y a su variedad de hábitos alimenticios, encontrándose en la mayoría de los ecosistemas terrestres (Melo et al. 2009). Este resultado concuerda con los hallazgos de la presente investigación.

Tabla 4. Densidad (Ind. m<sup>2</sup>) de la distribución de la macrofauna del suelo a lo largo de una cronosecuencia post-minería y bosque de referencia.

| <b>Especies</b>    | <b>4 años</b> | <b>11 años</b> | <b>21 años</b> | <b>Bosque</b> |
|--------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| Hymenoptera        | 152           | 892            | 560            | 164           |
| Coleoptero         | 24            | 20             | 16             | 76            |
| Olygochetos        | 16            | 56             | 48             | 20            |
| Polyxenidae        | 16            | 12             | 88             | 36            |
| Pseudoescorpionida | 4             | 0              | 0              | 0             |
| Blattodea          | 4             | 4              | 0              | 0             |
| Gasteropoda        | 4             | 16             | 12             | 4             |
| Isoptera           | 0             | 0              | 0              | 64            |
| Aranae             | 0             | 16             | 0              | 4             |
| Acariformes        | 0             | 0              | 4              | 4             |
| Opiliones          | 0             | 8              | 0              | 8             |
| Symphyla           | 0             | 4              | 0              | 20            |
| Isopoda            | 0             | 20             | 92             | 0             |
| Hemiptera          | 0             | 4              | 8              | 4             |
| Planaria           | 0             | 0              | 4              | 0             |
| Homoptera          | 0             | 4              | 4              | 0             |

- **Grupos funciones de macrofauna del suelo**

En las parcelas de 11 y 21 años de abandono, se encontraron mayor predominancia de hymenoptera y oligochetos pertenecientes al grupo funcional de ingenieros del suelo. La presencia de olygochetos es sumamente relevante por impulsar la formación de estructuras del suelo y de la dinámica de la materia orgánica (Fonte et al. 2012). En el caso de detritívoros, de la misma manera las parcelas de 11 y 21 años presentaron mayor predominancia, siendo coleópteros, isopodas y polyxenida los más representativos. Para el grupo herbívoros, se encontró mayor predominancia en las parcelas de 11 y 4 años de abandono, siendo los coleópteros los más representativos. Esto concuerda con Machado et al. (2018), quienes indican que estos insectos se encuentran en las hojarascas de las plantas en distintas etapas de descomposición. Mientras que la parcela de 11 y 4 años de abandono, presentaron mayor predominancia de depredadores (Tabla 5).

Por otra parte, se ha demostrado que existe una variación notoria de los grupos funcionales de acuerdo al grado de perturbación (años de abandono) y recursos disponibles del suelo, tal como mencionan Gutiérrez-Bermúdez, Mendieta-Araica y Noguera-Talavera (2020); García, Ramírez y Sánchez (2018). Estos resultados también concuerdan con lo reportado por Cabrera, Robaina y Ponce de Leon (2011), que mencionan que los grupos funcionales más representativos son los ingenieros del suelo y detritívoros (Tabla 5).

Tabla 5. Composición funcional de la macrofauna del suelo en cada tiempo de abandono y bosque de referencia.

| Grupo funcional      | Orden              | Años de abandono |            |            | Bosque    | Total      |
|----------------------|--------------------|------------------|------------|------------|-----------|------------|
|                      |                    | 4 años           | 11 años    | 21 años    |           |            |
| Ingenieros del suelo | Hymenoptera        | 43               | 394        | 140        | 62        | 577        |
|                      | Oligochetos        | 7                | 18         | 14         | 7         | 39         |
|                      | Isoptera           | 1                | 0          | 0          | 16        | 1          |
| <b>Total</b>         |                    | <b>50</b>        | <b>412</b> | <b>154</b> | <b>69</b> | <b>616</b> |
| Detritívoros         | Coleoptero         | 6                | 5          | 4          | 21        | 15         |
|                      | Isopoda            | 0                | 5          | 23         | 0         | 28         |
|                      | Polyxenida         | 5                | 5          | 14         | 9         | 24         |
|                      | Blattodea          | 1                | 1          | 0          | 0         | 2          |
| <b>Total</b>         |                    | <b>12</b>        | <b>16</b>  | <b>41</b>  | <b>30</b> | <b>69</b>  |
| Herbívoros           | Coleopteros        | 6                | 5          | 4          | 21        | 15         |
|                      | Hemiptera          | 0                | 1          | 2          | 1         | 3          |
| <b>Total</b>         |                    | <b>6</b>         | <b>6</b>   | <b>6</b>   | <b>22</b> | <b>18</b>  |
| Depredadores         | Aranae             | 0                | 4          | 0          | 1         | 4          |
|                      | Opiliones          | 0                | 2          | 0          | 2         | 2          |
|                      | Pseudoscorpionidae | 1                | 0          | 0          |           | 1          |
|                      | Coleoptera         | 6                | 5          | 4          | 21        | 15         |
| <b>Total</b>         |                    | <b>7</b>         | <b>11</b>  | <b>4</b>   | <b>24</b> | <b>22</b>  |

#### 4.1.2. Biomasa de macrofauna

- **Biomasa total por estratos**

Se encontró una mayor biomasa de macrofauna en las profundidades de 10 cm. Las parcelas de 4 y 21 años de abandono presentaron biomásas ligeramente similares en comparación con la parcela de 11 años de abandono. Las parcelas de 4 y 11 años de abandono presentaron similar biomasa en hojarasca, pero menor en comparación con la parcela de 21 años de abandono (Figura 8).

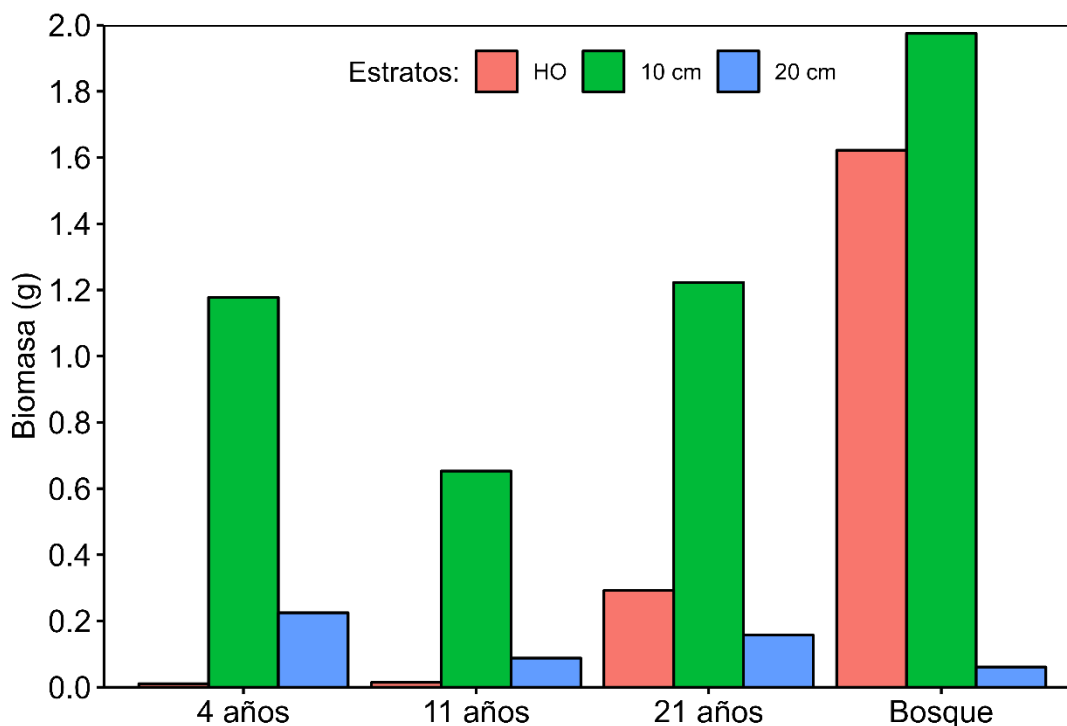


Figura 8. Biomasa de la macrofauna edáfica por estratos.

En el bosque de referencia, para el estrato de 10 cm de profundidad los mayores componentes en biomasa fueron: polyxenida (1,82 g), coleópteros (0,05 g), termitas (0,03 g) y lombrices (0,03 g). Para la parcela con 21 años de abandono, estuvo dominado por oligochetos (0,93 g). mientras que, en la parcela con 4 años de abandono, estuvo dominado por coleópteros (0,94 g), y en el tiempo de abandono de 11 años, olygochetos (0,41 g) fue el más representativo en biomasa.

- **Biomasa total por tiempo de abandono y bosque de referencia**

Las parcelas de 4 y 11 años de abandono presentaron una menor biomasa total en comparación con la parcela de 21 años de abandono (Figura 9). los grupos taxonómicos más representativo en biomasa fueron: polyxenida (3,6 g) y coleópteros (0,06 g), mientras que para la parcela de 11 años y 21 años fue olygochetos (0,46 g y 1,08 g) respectivamente. La parcela de 4 años de abandono tuvo presente a coleópteros como su principal fuente de biomasa (0,94 g).

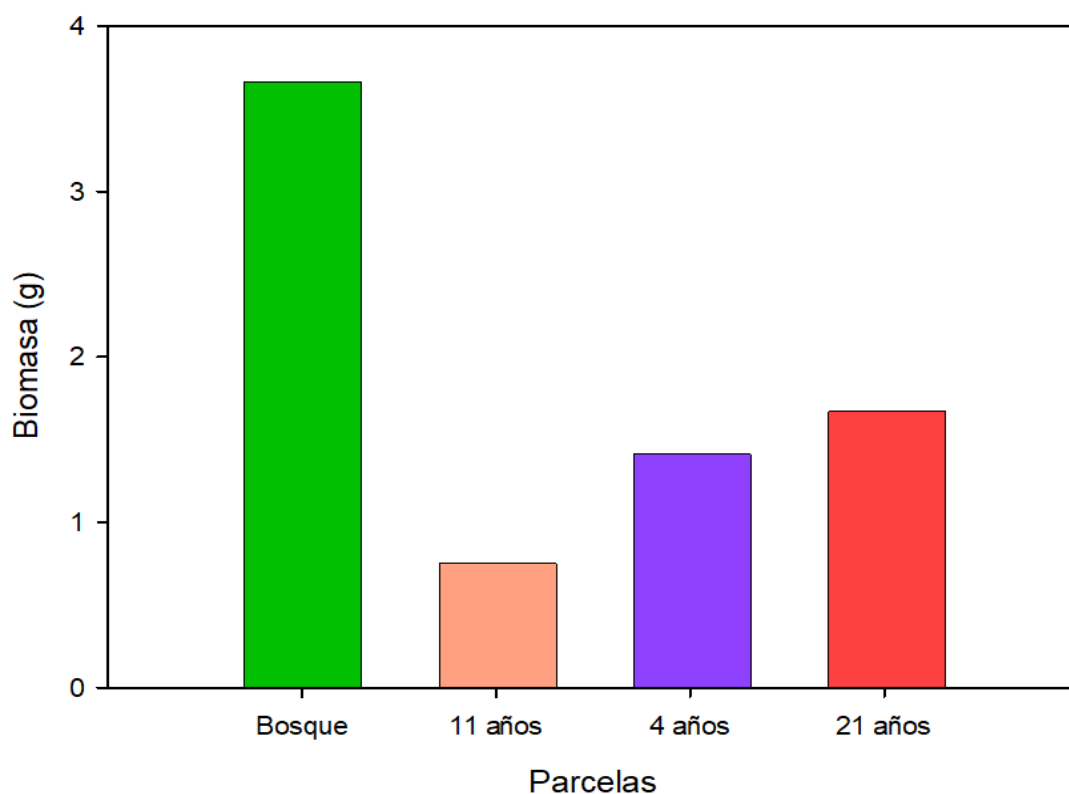


Figura 9. Biomasa total de la macrofauna a lo largo de una cronosecuencia post-mineria y bosque de referencia.

Asimismo, la prueba de kruskal wallis, tomando como referencia el total de hojarasca con los 10 cm de profundidad, nos indica que no hubo diferencias significativas en la biomasa por metro cuadrado ( $\text{g/m}^2$ ) ( $p > 0,05$ ), sin embargo, se puede observar un progresivo aumento de la biomasa a medida que las parcelas tiene más años de abandono (Figura 10).

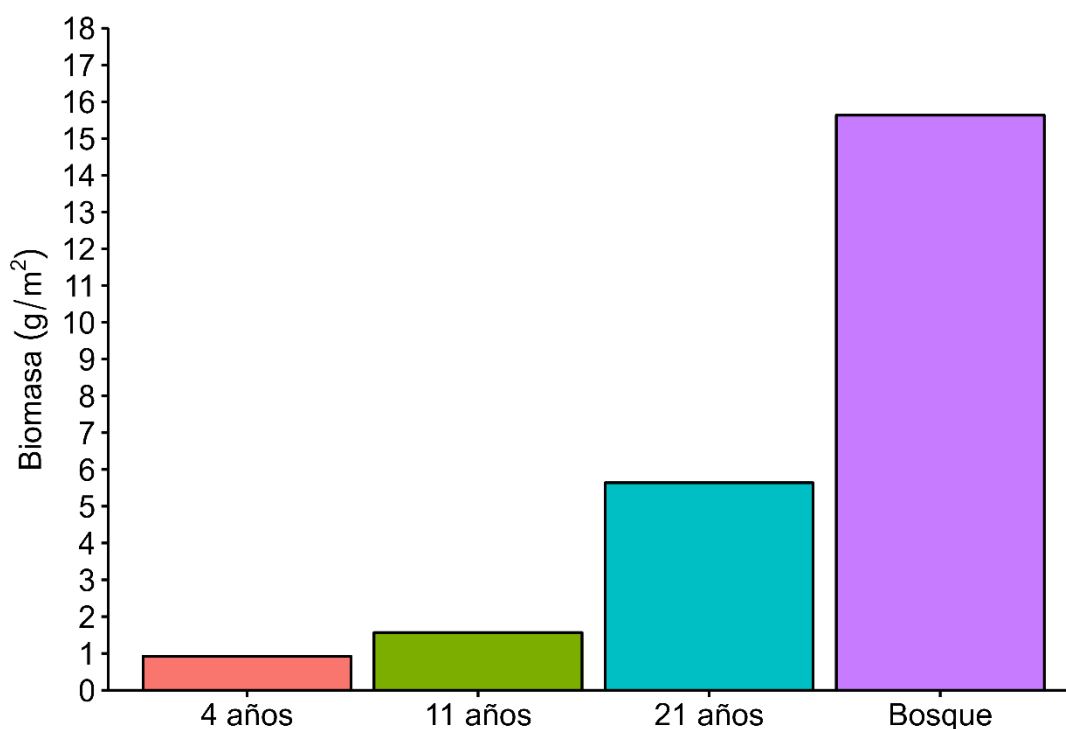


Figura 10. Biomasa a lo largo de una cronosecuencia post-minería y bosque de referencia.

La parcela con tiempo de abandono de 21 años tuvo 3,6 (g/m<sup>2</sup>) veces más biomasa que la parcela de 11 años, y 6,1 (g/m<sup>2</sup>) veces que la parcela de 4 años de abandono.

#### 4.2. Características físico-químicas del suelo

La parcela con mayor M.O (2,1 %) y C.O (1,2 %) fue la de 4 años de abandono (Tabla 6), esto posiblemente influyo en la riqueza taxonómica y la biomasa total (g) de macrofauna que fue ligeramente menor que la parcela de 21 años (Tabla 2 y Figura 9). Estos valores son inferiores a los reportados por Machado et al. (2018), quien encontró una mayor M.O (2,3 %) en áreas minadas. Asimismo, la diversidad de macrofauna estaría relacionado con la concentración y disponibilidad de Materia orgánica en el suelo (Geremia et al. 2015). La parcela con tiempo 21 años de abandono tuvo un menor C.O y mayor riqueza de especies vegetales, siendo contradictorio con lo reportado por Fischer et al. (2019), el cual menciona que la riqueza de especies vegetales incrementa positivamente en el carbono orgánico del suelo. El pH vario de 5,6 a 6,5 a lo largo de las parcelas con tiempos de abandono, el pH fue mayor (menos acida) en la parcela de 4 años de abandono. Estudios recientes indican que el pH, puede reducir las tasas de descomposición

alterando la composición de las comunidades microbianas del suelo (Dawson-Glass et al. 2023).

Tabla 6. Análisis de suelo por cada parcela de tiempos de abandono.

| Parcelas             | pH  | C.Orgánico (%) | M.O % | N % | P ppm | CIC  | Are  | Lim  | Arc  |
|----------------------|-----|----------------|-------|-----|-------|------|------|------|------|
| 4 años               | 6,5 | 1,2            | 2,1   | 0,1 | 1,0   | 9,9  | 86,6 | 8,0  | 3,40 |
| 11 años              | 5,7 | 0,8            | 1,4   | 0,1 | 4,0   | 7,8  | 72,6 | 8,0  | 19,4 |
| 21 años              | 5,6 | 0,1            | 0,2   | 0,1 | 3,3   | 14,0 | 70,6 | 12,0 | 17,4 |
| Bosque de referencia | 4,7 | 2,0            | 3,4   | 0,2 | 4,6   | 20,3 | 32,6 | 30,0 | 37,4 |

Are=Arena; Lim=Limo; Arc=Arcilla; M.O=Materia organica; N= Nitrogeno; P= Fosforo

Se realizó un ANOVA para observar diferencias significativas entre las propiedades físico-químicas del suelo para la variable pH y C.O %, mientras que, para el CIC, se utilizó kruskal wallis. Todas las variables analizadas en la tabla 7, tuvieron significancia estadística ( $p < 0,05$ ).

Tabla 7. Variación de las propiedades físico-químicas en las parcelas de estudio.

| Tiempo de abandono | pH     | C.O %  | CIC*    | Rango de clase textural |
|--------------------|--------|--------|---------|-------------------------|
| 4 años             | 6,47 a | 1,19 a | 9,86 ab | arena franca            |
| 11 años            | 5,75 b | 0,83 b | 7,8 a   | franco arenoso          |
| 21 años            | 5,57 c | 0,10 c | 14 ab   | franco arenoso          |
| Bosque             | 4,74 d | 1,97 d | 20,34 b | franco arcilloso        |

C.O% = Carbono orgánico %; CIC= Capacidad de intercambio catiónico. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). \* Prueba de kruskal wallis.

La prueba pos hoc de tukey, indica que, para el pH, la parcela con tiempo de abandono de 4 años, presenta el mayor valor de pH, siendo menos ácido con respecto a las demás ( $p < 0,05$ ). Mientras que el bosque de referencia presenta pH inferior a las demás, presentando más acidez ( $p < 0,05$ ). Mayor contenido de C.O %, presenta el bosque, siendo superior a los demás ( $p < 0,05$ ). El CIC fue superior en el bosque, siendo similar con la parcela con tiempo de abandono de 21 años. Estudios indican que los suelos tropicales mayormente son ácidos (Nanganoa et al. 2019) afirmando que la biología en el suelo se ve influenciada directamente por el pH y la disponibilidad de nutrientes, que son esenciales para las plantas (Rahman et al. 2024), esto podría explicar porque la parcela de 21 años de abandono tuvo menor abundancia de especies vegetales (Tabla 9). En general, la estructura del suelo tiene siempre una influencia en el crecimiento y la actividad de los organismos que habitan en él, que a su vez, estos organismos como los microbios, la fauna y las plantas afectan a la estructura (Angers y Caron 1998).

#### 4.2.1. Influencia de las características físico-químicas del suelo con la macrofauna edáfica

Para analizar la influencia, se utilizó el coeficiente de Pearson ( $r$ ). En la tabla 8, se observa que hay una relación inversa entre la biomasa y el pH ( $p < 0,10$ ). Se esperaría que, a mayores valores en el pH, la biomasa de la macrofauna disminuye, esto se debería a que el pH tienen una influencia en la biota del suelo (Rahman et al. 2024). Así mismo, se encontró una fuerte asociación de la biomasa con el CIC ( $P < 0,05$ ). Por lo tanto, se esperaría encontrar mayor biomasa de macrofauna a medida que aumente el CIC. Este resultado concuerda con Martines (2019), quien relaciono la abundancia de macrofauna con el aumento de CIC en diferentes sistemas de uso de tierra.

Tabla 8. Correlación de las características físico-químicas con la macrofauna.

|            | pH     | M.O (%) | CIC     | C.O (%) | Arena | Limo  | Arcilla |
|------------|--------|---------|---------|---------|-------|-------|---------|
| Abundancia | -0,9   | -0,03   | 0,59    | -0,02   | -0,17 | 0,29  | 0,04    |
| Biomasa    | -0,91* | 0,6     | 0,97*** | 0,61    | 0,4   | -0,29 | -0,51   |
| Riqueza    | -0,67  | 0,03    | 0,11    | 0,04    | -0,72 | 0,8   | 0,62    |

\*\*\* 0,05; \*\* 0,01; \* 0,10

- **Influencia de los tiempos de abandono en la macrofauna edáfica**

Para analizar la influencia del tiempo de abandono de las parcelas con la macrofauna, se utilizó el coeficiente de Pearson ( $r$ ). Según la gráfica 10, el tiempo de abandono tiene una relación positiva alta ( $r = 0,96$ ;  $r = 0,90$ ) con la biomasa ( $\text{g/m}^2$ ) y abundancia ( $\text{ind/m}^2$ ) de la macrofauna respectivamente. Sin embargo, no son significativas ( $p > 0,05$ ). Estos resultados sugieren que, a mayor tiempo de abandono de las parcelas evaluadas, se esperaría encontrar una mayor biomasa y abundancia de macrofauna (Figura 11).

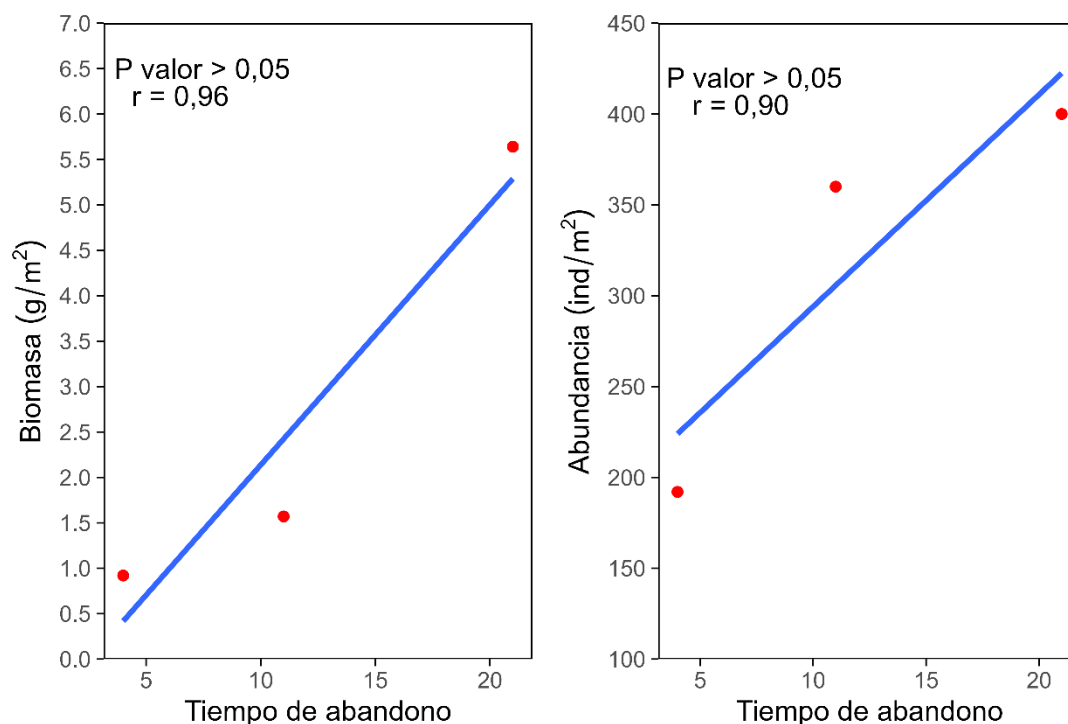


Figura 11. Correlación de la biomasa (g/m<sup>2</sup>) y abundancia con los tiempos de abandono.

#### 4.3. Abundancia y riqueza de la vegetación

En la parcela de 11 años de abandono, hubo una mayor abundancia de especies en comparación de la parcela de 4 y 21 años de abandono. Sin embargo, la parcela de 21 años, presenta mayor riqueza de especies (Tabla 9).

Tabla 9. Abundancia y riqueza de especies vegetales a lo largo de una cronosecuencia post-minería.

| Especies vegetales           | 11 años | 4 años | 21 años |
|------------------------------|---------|--------|---------|
| <i>Apeiba tibourbou</i>      |         |        | 1       |
| <i>Cecropia membranacea</i>  | 2       | 9      | 2       |
| <i>Cecropia polystachya</i>  | 2       | 16     | 1       |
| <i>Chimarrhis sp1</i>        |         |        | 1       |
| <i>Chromolaena laevigata</i> | 2       |        |         |
| <i>Cordia sp1</i>            |         | 2      |         |
| <i>Crotalaria sp1</i>        |         |        | 4       |
| <i>Guazuma ulmifolia</i>     | 1       |        |         |
| <i>Irlbachia alata</i>       |         |        |         |
| <i>Lantana camara</i>        | 2       | 3      | 7       |
| <i>Machaerium sp1</i>        | 3       | 3      | 2       |
| <i>Machaerium hirtum</i>     |         |        | 7       |
| <i>Machaerium kegelii</i>    | 1       |        |         |
| <i>Muntingia calabura</i>    |         | 1      |         |
| <i>Myrsine sp1</i>           |         |        | 3       |

**Continuación de la Tabla 9.** Abundancia y riqueza de especies vegetales a lo largo de una cronosecuencia post-minería.

| <b>Especies vegetales</b>    | <b>11 años</b> | <b>4 años</b> | <b>21 años</b> |
|------------------------------|----------------|---------------|----------------|
| <i>Ochroma pyramidale</i>    | 33             | 24            | 3              |
| <i>Ormosia amazonica</i>     |                |               | 1              |
| <i>Piper aduncum</i>         | 6              | 5             | 21             |
| <i>Psidium guajava</i>       |                |               | 6              |
| <i>Solanum caricaefolium</i> | 1              |               |                |
| <i>Tetrapteryx sp1</i>       |                |               |                |
| <i>Trema micranta</i>        | 1              |               |                |
| <i>Vernonanthura patens</i>  | 17             |               | 1              |
| <i>Vismia gracilis</i>       | 2              | 1             |                |
| <i>Vismia sp1</i>            |                | 1             | 1              |
| <b>Abundancia</b>            | 73             | 65            | 61             |
| <b>Riqueza</b>               | 13             | 10            | 15             |

Las especies más abundantes en vegetación fueron: *Ochroma pyramidale* y *Vernonanthura patens* respectivamente para la parcela de 11 años de abandono. Para la parcela de 4 años fueron: *Ochroma pyramidale* y *Cecropia polystachya*. Mientras que para la parcela de 21 años fue *Piper aduncum*.

#### **4.3.1. Influencia de la vegetación en la macrofauna edáfica**

Según la tabla 10, la biomasa de macrofauna tiene una relación inversa y no significativa ( $P > 0,05$ ) con la abundancia de vegetación. Esto quiere decir que a medida que aumente la abundancia de la vegetación, la biomasa de macrofauna disminuiría. Sin embargo, la biomasa se relaciona positivamente con la riqueza de vegetación ( $p > 0,05$ ). Esto quiere decir que se esperaría mayor incremento de biomasa de macrofauna a medida que se incremente la riqueza de la vegetación, esto podría deberse a que la diversidad de especies vegetales son más productivas e incrementa la estabilidad de agregados del suelo (Pohl et al. 2012). Todas las correlaciones resultaron no significativas. Por otra parte, la abundancia, biomasa y riqueza de macrofauna, se ve influenciada por la riqueza de la vegetación. Esto podría explicarse en función a que la diversidad de especies vegetales proporcionarían alimentos por medio de sus residuos a la microflora y fauna del suelo (Angers y Caron 1998). Asimismo, la diversidad de especies de plantas le brindan a la biota del suelo hábitats propicios para su desarrollo, debido a la disponibilidad de nutrientes

y condiciones de temperatura y humedad que favorecen su desarrollo (Hernández et al. 2020). Coincidiendo de igual manera con Wu y Wang (2019) en el cual comprobaron la hipótesis de que la macrofauna depende de las condiciones específicas de microhábitats del suelo creadas por la vegetación.

Tabla 10. Correlación de la abundancia y riqueza vegetal con la macrofauna edáfica.

|            | <b>Abundancia Vegetación</b> | <b>Riqueza Vegetación</b> |
|------------|------------------------------|---------------------------|
| Biomasa    | -0,67                        | 0,87                      |
| Abundancia | 0,01                         | 0,97                      |
| Riqueza    | 0,65                         | 0,6                       |

#### 4.4. Cambios en la composición de ordenes de macrofauna edáfica

Se encontró diferencias significativas en la composición de ordenes de la macrofauna edáfica (PERMANOVA,  $p < 0,05$ , Tabla 11). Estas diferencias en la composición de las comunidades de macrofauna estarían relacionadas con los estratos (PERMANOVA,  $p = 0,01$ , Tabla 8), mientras que entre parcelas no se encontró diferencias significativas (PERMANOVA,  $p = 0,44$ , Tabla 11). Asimismo, se encontró que la interacción entre parcelas y estratos no fue significativa.

Tabla 11. Resultados del permanova de 2 vías de macrofauna, utilizando bray-curtis.

|                    | df | SS     | MS     | Pseudo-F | P(perm)     |
|--------------------|----|--------|--------|----------|-------------|
| Parcelas           | 3  | 9605,2 | 3201,7 | 1,05     | 0,44        |
| Estratos           | 2  | 10633  | 5316,4 | 2,23     | <b>0,01</b> |
| Parcela × Estratos | 6  | 18705  | 3117,6 | 1,31     | 0,15        |
| Total              | 33 | 92695  |        |          |             |

df: grados de libertad; SS: suma de cuadrados; MS: cuadrado medio.

La composición de géneros de la macrofauna edáfica fue estadísticamente diferente entre los estratos. El posthoc test, nos sugiere que existe una diferencia significativa entre la composición de comunidades de macrofauna entre los estratos de 10-20 cm con hojarasca (Permanova,  $p < 0,05$ ), mientras que la composición de macrofauna entre los estratos 10 cm y 20 cm fueron similares (Permanova posthoc test,  $p > 0,05$ , Tabla 12).

Tabla 12. Prueba Permanova por pares para la macrofauna.

| Estratos      | P(perm)       |
|---------------|---------------|
| 10 cm - 20 cm | 0,30          |
| 10 cm - HO    | <b>0,039*</b> |
| 20 cm - HO    | <b>0,00*</b>  |

HO: Hojarasca

Se utilizó la prueba SIMPER, para indicar que ordenes de macrofauna hace que exista diferencias entre los estratos. La prueba indica que Hymenoptera, fue el grupo taxonómico que más contribuyó a la disimilitud entre los estratos de 10 cm y hojarasca (19,84 %), asimismo, olygochetos, polyxenida, coleópteros, gasteropoda, isopoda e isóptera tuvieron contribuciones menores con un porcentaje acumulado de 48,99 %. Para los estratos de 20 cm y hojarasca hymenoptera fue el orden que más contribuyo en la disimilitud (26,66%). Asimismo, olygochetos, coleopertos, polyxenida y gasterópoda tuvieron contribuciones menores con un porcentaje acumulado de 45,37%. Los patrones de distribución de la abundancia y el orden jerárquico de la macrofauna a lo largo de la cronosecuencia, presentaron diferencias menores, observándose pendientes similares. Hymenoptera, oligochetos, coleópteros e isopodas se ubicaron en las posiciones más altas de la curva. Sin embargo, hymenoptera presento una marcada dominancia respecto a la abundancia de algunos órdenes.

Las especies menos dominantes o raras fueron blattodea, symphyla, homoptera y hemiptera para el tiempo de abandono de 11 años. Mientras que para la parcela de 21 años de abandono fueron, planaria, acariformes y homopterass. Para la parcela de 4 años de abandono fueron blattodea, Pseudoescorpionida, isóptera y gasterópoda y para el bosque de referencia fueron acariformes, hemiptera, aranae y gasterópoda (Figura 12).

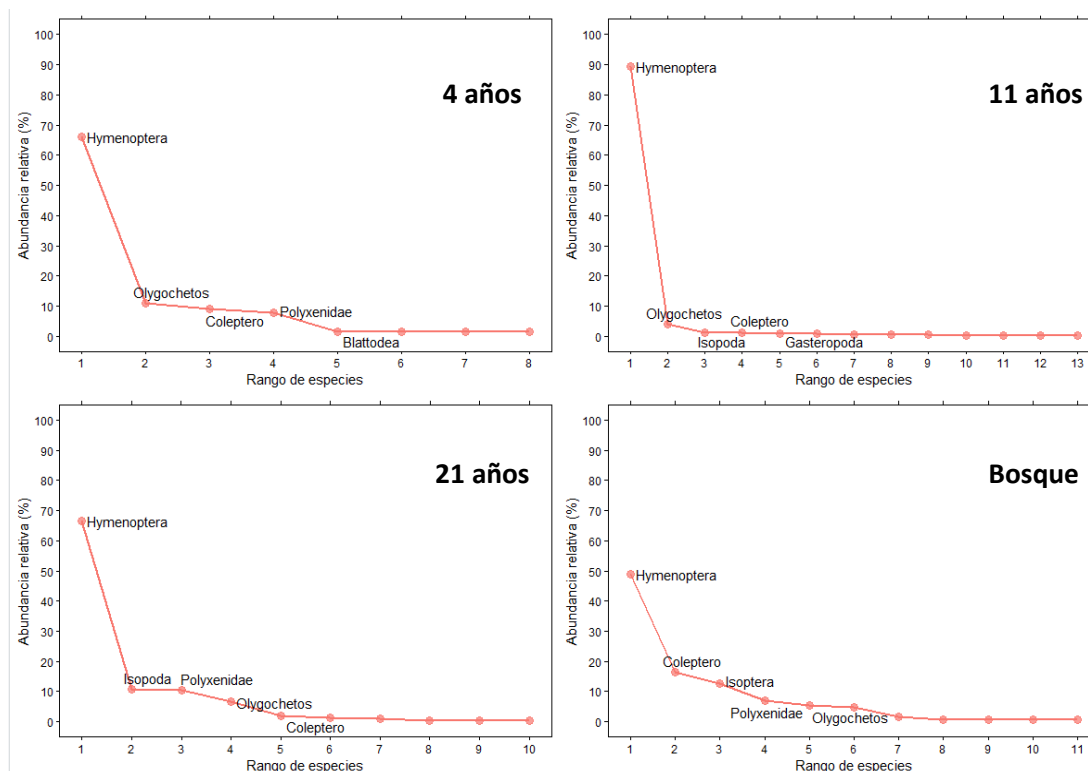


Figura 12. Curva de rango-abundancia para la composición taxonómica en una cronosecuencia post-minería y bosque de referencia.

### • Ordenes de macrofauna indicadoras

Se realizó un IndVal para identificar posibles especies indicadoras en las parcelas con diferentes tiempos de abandono y bosque de referencia. Según la Tabla 13, nos indica que el orden Pseudoescorpionida es característico de áreas con poco tiempo de abandono (4 años de abandono), sin embargo, no fue significativo ( $p > 0,05$ ). Araneae fue el orden que más se caracterizó con el sitio de 11 años de abandono ( $p > 0,05$ ). Mientras el orden isoptera es un posible indicador del bosque de referencia por su alta especificidad, y regular fidelidad ( $p < 0,05$ ). Por otro lado, la parcela con 21 años de abandono no fue posible identificar ninguna especie indicadora.

Tabla 13. Especies indicadoras (Taxa orden) de la macrofauna edáfica determinada mediante el método IndVal.

| Parcelas      | Orden indicador    | (A)         | (B)         | P value      |
|---------------|--------------------|-------------|-------------|--------------|
| 4 años        | Pseudoescorpionida | 1           | 0,25        | 1            |
| 11 años       | Araneae            | 0,8         | 0,5         | 0,38         |
| <b>Bosque</b> | <b>Isóptera</b>    | <b>0,94</b> | <b>0,75</b> | <b>0,02*</b> |
|               | Symphyla           | 0,86        | 0,75        | 0,05         |

A = Especificidad; B = Fidelidad.

## CONCLUSIONES

La mayor abundancia, riqueza, diversidad y biomasa de macrofauna se registraron en las parcelas con mayor tiempo de abandono y en los primeros 10 cm de profundidad. Se acepta la hipótesis planteada sobre el incremento en la diversidad y abundancia grupos taxonómicos de la macrofauna edáfica a lo largo de la cronosecuencia después del abandono por actividades mineras.

Las propiedades físico-químicas estarían influenciando en la composición de macrofauna. El CIC influyó de manera significativa en la colonización de macrofauna. Por lo tanto, se acepta parcialmente la hipótesis planteado, debido a que solo la CIC se correlacionó significativamente con la abundancia, riqueza y biomasa macrofauna edáfica.

La riqueza de especies de la vegetación en las parcelas de estudio se correlacionó positivamente en la abundancia, riqueza y biomasa de la macrofauna, mientras que la abundancia tuvo influencia positiva en la riqueza y negativo en la biomasa de macrofauna. Por lo tanto, se acepta parcialmente la hipótesis, debido a que solo riqueza de especies se correlacionó significativamente con la abundancia, riqueza y biomasa macrofauna edáfica.

Isóptera fue el único orden característico del bosque, resultando ser un posible indicador de sitio. Los cambios en la macrofauna, se observó solo en los estratos. Tanto la profundidad de 10 y 20 cm tuvo diferencias significativas con la hojarasca. Hymenoptera fue el orden que más contribuyó en las diferencias para ambos estratos. Por lo tanto, se acepta la hipótesis sobre el grupo taxonómico determinante de macrofauna en las áreas degradadas por la minería.

## **SUGERENCIAS**

No se pudo evidenciar diferencias significativas entre las diferentes parcelas con tiempo de abandono, posiblemente esto se deba a los números de replicas. Por tanto. Se sugiere para futuras investigación, considerar mínimo 6 réplicas de monolito por cada sitio de muestreo y que las profundidades tengan un diseño balanceado. Asimismo, la distribución del muestreo sea del tipo triangular, con la finalidad de ocupar el sitio o área a estudiar y sugiero que tomen en cuenta la tasa de infiltración del suelo, y una parcela testigo recientemente alterado. Es necesario aplicar técnicas más robustas para observar diferencias. Asimismo, la aplicación de otros métodos de diversidad como los números efectivos de especies propuesto por Hill.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, H.S., DA SILVA, R.F., GROLI, A.L. y SCHIED, D.L., 2017. Ocorrência e diversidade da fauna edáfica sob diferentes sistemas de uso do solo. *Revista Brasileira De Tecnologia Agropecuária*, vol. 1, no. 1, pp. 15-23.
- AMAZONAS, N.T., VIANI, R.A.G., REGO, M.G.A., CAMARGO, F.F., FUJIHARA, R.T. y VALSECHI, O.A., 2017. Soil macrofauna density and diversity across a chronosequence of tropical forest restoration in Southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 78, no. 3, pp. 449-456. ISSN 1678-4375. DOI 10.1590/1519-6984.169014.
- ANDERSON, J.M. y INGRAM, J.S.I., 1993. A handbook of methods. *CAB International, Wallingford, Oxfordshire*, vol. 221.
- ANDIA, W., 2017. *Manual de investigación universitaria: Pautas para la planificación de una tesis*. Lima, Perú: Ediciones Arte y Pluma. ISBN 978-612-4761-2-5.
- ANGERS, D.A. y CARON, J., 1998. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, vol. 42, no. 1-2, pp. 55-72. ISSN 01682563. DOI 10.1007/978-94-017-2691-7\_3.
- ARAGÓN-GASTÉLUM, J.L., FLORES, J., YÁÑEZ-ESPINOSA, L., BADANO, E., RAMÍREZ-TOBÍAS, H.M., RODAS-ORTÍZ, J.P. y GONZÁLEZ-SALVATIERRA, C., 2014. Induced climate change impairs photosynthetic performance in *Echinocactus platyacanthus*, an especially protected Mexican cactus species. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, vol. 209, no. 9, pp. 499-503. ISSN 03672530. DOI 10.1016/j.flora.2014.06.002.
- ASNER, G.P. y TUPAYACHI, R., 2016. Accelerated losses of protected forests from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environmental Research Letters*, vol. 12, no. 9, pp. 094004. ISSN 1748-9326. DOI 10.1088/1748-9326/aa7dab.
- BARDGETT, R., 2002. Causes and consequences of biological diversity in soil. *Zoology*, vol. 105, no. 4, pp. 367-375. ISSN 09442006. DOI 10.1078/0944-2006-00072.
- BARETTA, D., BROWN, G.G. y CARDOSO, E., 2010. Potential of macrofauna and other edaphic variables as indicators of soil quality in areas with *Araucaria angustifolia*. *Acta Zoologica Mexicana*, vol. 26, no. Especial 2, pp. 135-150. ISSN 0065-1737.
- BAUTISTA, A., ETCHEVERS, J., DEL CASTILLO, R. y GURTIÉRREZ, C., 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *ecosistemas*, vol. 13, no. 2, pp. 90-97. ISSN 00068969. DOI <https://doi.org/10.7818/ECOS.572>.
- BAZZAZ, F.A., 1979. The Physiological Ecology of Plant Succession. *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 10, no. 1, pp. 351-371. ISSN 0066-4162. DOI 10.1146/annurev.es.10.110179.002031.

- BINKLEY, D. y FISHER, R.F., 2019. *Ecology and Management of Forest Soils*. Oxford: Wiley. ISBN 9781119455653.
- BLOIS, J.L., ZARNETSKE, P.L., FITZPATRICK, M.C. y FINNEGAN, S., 2013. Climate Change and the Past, Present, and Future of Biotic Interactions. *Science*, vol. 341, no. 6145, pp. 499-504. ISSN 0036-8075. DOI 10.1126/science.1237184.
- BONE, J., BARRACLOUGH, D., EGGLETON, P., HEAD, M., JONES, D.T. y VOULVOULIS, N., 2014. Prioritising Soil Quality Assessment through the screening of sites: the use of publicly collected data. *Land Degradation & Development*, vol. 25, no. 3, pp. 251-266. ISSN 10853278. DOI 10.1002/ldr.2138.
- BORGES, S.R., SANTOS, R.S., OLIVEIRA, D.M.S., SOUZA, I.F., VERBURG, E.E.J., PIMENTEL, L.G., CRUZ, R.S. y SILVA, I.R., 2019. Practices for rehabilitating bauxite-mined areas and an integrative approach to monitor soil quality. *Land Degradation & Development*, vol. 30, no. 7, pp. 866-877. ISSN 1085-3278. DOI 10.1002/ldr.3273.
- CABRERA, G., 2012. La macrofauna edáfica como indicador del estado de conservación/perturbación del suelo. *Pastos y Forrajes*, vol. 35, no. 4, pp. 349-363. ISSN 08640394.
- CABRERA, G., 2019. *Evaluación de la macrofauna edáfica como bioindicador del impacto del uso y calidad del suelo en el occidente de Cuba*. Tesis doctoral. Alicante, España: Universidad de Alicante.
- CABRERA, G., ROBAINA, N. y PONCE DE LEON, D., 2011. Composición funcional de la macrofauna edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba. *Pastos y Forrajes*, vol. 34, no. 3, pp. 313-346. ISSN 0864-0394.
- CANAHUIRE, R., 2017. *Composición florística y estructura de la recuperación natural en un área degradado por minería en la comunidad nativa de tres islas, Tambopata - Madre de Dios*. Tesis de pre grado. Puerto Maldonado: Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios.
- CARDOSO, E.J.B.N., VASCONCELLOS, R.L.F., BINI, D., MIYAUCHI, M.Y.H., SANTOS, C.A. dos, ALVES, P.R.L., PAULA, A.M. de, NAKATANI, A.S., PEREIRA, J. de M. y NOGUEIRA, M.A., 2013. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola*, vol. 70, no. 4, pp. 274-289. ISSN 0103-9016. DOI 10.1590/S0103-90162013000400009.
- CARMONA, J., RAMÍREZ, R., BOJORGE-GARCÍA, M., GONZÁLEZ, B. y CANTORAL-URIZA, E.A., 2016. Estudio del valor indicador de las comunidades de algas bentónicas: Una propuesta de evaluación y aplicación en el río Magdalena, ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 32, no. 2, pp. 139-152. ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.2016.32.02.01.

- CARO, T.M. y O'DOHERTY, G., 1999. On the Use of Surrogate Species in Conservation Biology. *Conservation Biology*, vol. 13, no. 4, pp. 805-814. ISSN 0888-8892. DOI 10.1046/j.1523-1739.1999.98338.x.
- CARRASCO-DÍAZ, S., 2008. *Metodología de la investigación científica: Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación*. 2da. Lima-Perú: Editorial San Marcos. ISBN 978-9972-38-344-1.
- CASTILLO, R., 2016. *Diversidad y abundancia de macrofauna edáfica en tres sistemas de uso de suelo Illpa-Puno*. Tesis de pre grado. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- CCOYCCA, S., 2018. *Estudio de la macrofauna del suelo en sistemas agroforestales en los distritos de laberinto e Inambari del departamento de Madre de Dios*. Tesis de pre grado. Puerto maldonado: Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios.
- CHANG, C.C. y TURNER, B.L., 2019. Ecological succession in a changing world. En: R. BARDGETT (ed.), *Journal of Ecology*, vol. 107, no. 2, pp. 503-509. ISSN 00220477. DOI 10.1111/1365-2745.13132.
- CLEMENTS, F.E., 1916. *Plant succession; an analysis of the development of vegetation*,. Washington: Carnegie Institution of Washington,.
- CSILLIK, O. y ASNER, G.P., 2020. Aboveground carbon emissions from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 1, pp. 014006. ISSN 1748-9326. DOI 10.1088/1748-9326/ab639c.
- DAMSCHEN, E.I., BRUDVIG, L.A., HADDAD, N.M., LEVEY, D.J., ORROCK, J.L. y TEWKSBURY, J.J., 2008. The movement ecology and dynamics of plant communities in fragmented landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, no. 49, pp. 19078-19083. ISSN 0027-8424. DOI 10.1073/pnas.0802037105.
- DAWSON-GLASS, E., HEWINS, C.R., BURKE, D.J. y STUBLE, K.L., 2023. Experimental increases in pH and P availability exert long-term impacts on decomposition in forests. *Applied Soil Ecology* [en línea], vol. 181, pp. 104654. ISSN 09291393. DOI 10.1016/j.apsoil.2022.104654. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0929139322002700>.
- DE CÁCERES, M., 2020. How to use the indicpecies package (ver. 1.7.8). . España:
- DE LIMA, K.D.R., CAMARA, R., CHAER, G.M., PEREIRA, M.G. y DE RESENDE, A.S., 2017. Soil fauna as bioindicator of recovery of degraded areas in the caatinga biome. *Revista Caatinga*, vol. 30, no. 2, pp. 401-411. ISSN 19832125. DOI 10.1590/1983-21252017v30n215rc.
- DE MEESTER, L., VANOVERBEKE, J., KILSDONK, L.J. y URBAN, M.C., 2016. Evolving Perspectives on Monopolization and Priority Effects. *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 31, no. 2, pp. 136-146. ISSN 01695347. DOI 10.1016/j.tree.2015.12.009.

- DORAN, J.W., COLEMAN, D.C., BEZDICEK, D.F. y STEWART, B.A., 1994. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. SSSA Special Publications. ISBN 9780891189305.
- DORAN, J.W. y PARKIN, T.B., 1994. Defining and Assessing Soil Quality. *Soil Science Society of America*. Madison, Wisconsin, USA: Inc. Special Publication, pp. 1-21.
- DUFRENE, M. y LEGENDRE, P., 1997. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, vol. 67, no. 3, pp. 345-366. ISSN 00129615. DOI 10.2307/2963459.
- DURAN-BAUTISTA, E.H., ARMBRECHT, I., SERRÃO ACIOLI, A.N., SUÁREZ, J.C., ROMERO, M., QUINTERO, M. y LAVELLE, P., 2020. Termites as indicators of soil ecosystem services in transformed amazon landscapes. *Ecological Indicators*, vol. 117, pp. 106550. ISSN 1470160X. DOI 10.1016/j.ecolind.2020.106550.
- ETTINGER, A.K. y HILLERISLAMBERS, J., 2013. Climate isn't everything: Competitive interactions and variation by life stage will also affect range shifts in a warming world. *American Journal of Botany*, vol. 100, no. 7, pp. 1344-1355. ISSN 00029122. DOI 10.3732/ajb.1200489.
- FISCHER, C., LEIMER, S., ROSCHER, C., RAVENEK, J., DE KROON, H., KREUTZIGER, Y., BAADE, J., BESSLER, H., EISENHAUER, N., WEIGELT, A., MOMMER, L., LANGE, M., GLEIXNER, G., WILCKE, W., SCHRÖDER, B. y HILDEBRANDT, A., 2019. Plant species richness and functional groups have different effects on soil water content in a decade-long grassland experiment. *Journal of Ecology*, vol. 107, no. 1, pp. 127-141. ISSN 13652745. DOI 10.1111/1365-2745.13046.
- FONTE, S.J., QUINTERO, D.C., VELÁSQUEZ, E. y LAVELLE, P., 2012. Interactive effects of plants and earthworms on the physical stabilization of soil organic matter in aggregates. *Plant and Soil* [en línea], vol. 359, no. 1-2, pp. 205-214. ISSN 0032-079X. DOI 10.1007/s11104-012-1199-2. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/s11104-012-1199-2>.
- FROUZ, J., ŠPALDOŇOVÁ, A., LHOTÁKOVÁ, Z. y CAJTHAML, T., 2015. Major mechanisms contributing to the macrofauna-mediated slow down of litter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 91, pp. 23-31. ISSN 00380717. DOI 10.1016/j.soilbio.2015.08.024.
- FUKAMI, T., 2015. Historical Contingency in Community Assembly: Integrating Niches, Species Pools, and Priority Effects. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 46, no. 1, pp. 1-23. ISSN 1543-592X. DOI 10.1146/annurev-ecolsys-110411-160340.
- GARCÍA, Y., RAMÍREZ, W. y SÁNCHEZ, S., 2012. Indicadores de la calidad de los suelos : una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos Y Forrajes*, vol. 35, no. 2, pp. 125-137. ISSN 0864-0394.

- GARCÍA, Y., RAMÍREZ, W. y SÁNCHEZ, S., 2018. Efecto de diferentes usos de la tierra en la composición y la abundancia de la macrofauna edáfica, en la provincia de Matanzas. *Pastos y Forrajes*, vol. 37, no. 3, pp. 313-321. ISSN 0864-0394.
- GASTON, K.J., 1996. Species richness: measure and measurement. *Biodiversity: A Biology of Numbers and Difference*, pp. 77-113.
- GEDOZ, M., FREITAS, E.M., SILVA, V.L. da y JOHANN, L., 2021. Edaphic Invertebrates as Indicators of Soil Integrity Quality. *Floresta e Ambiente*, vol. 28, no. 2. ISSN 2179-8087. DOI 10.1590/2179-8087-floram-2020-0069.
- GEREMIA, E., SEGAT, J., FACHINI, I., OLIVEIRA, E. y BARETTA, D., 2015. Fauna edáfica em pastagem perene sob diferentes fontes de nutrientes. *Revista Scientia Agraria*, vol. 16, no. 1, pp. 17-30.
- GÓMEZ, D., GODOY, M.C. y CORONEL, J.M., 2016. Macrofauna edáfica en ecosistemas naturales y agroecosistemas de la ecoregión esteros del iberá (Corrientes, Argentina). *Ciencia del Suelo*, vol. 34, no. 1, pp. 43-56. ISSN 03263169.
- GONGALSKY, K.B., MALMSTRÖM, A., ZAITSEV, A.S., SHAKHAB, S. V., BENGTSSON, J. y PERSSON, T., 2012. Do burned areas recover from inside? An experiment with soil fauna in a heterogeneous landscape. *Applied Soil Ecology*, ISSN 09291393. DOI 10.1016/j.apsoil.2012.03.017.
- GOTELLI, N.J. y COLWELL, R.K., 2011. Estimating species richness. *Biological diversity: frontiers in measurement and assessment*. Oxford: Oxford University Press, pp. 39-54.
- GRANADOS-VICTORINO, R.L., SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, A., MARTÍNEZ-CABRERA, D. y OCTAVIO-AGUILAR, P., 2017. Estructura y composición arbórea de tres estadios sucesionales de selva mediana subperennifolia del municipio de Huautla, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 88, no. 1, pp. 122-135. ISSN 18703453. DOI 10.1016/j.rmb.2017.01.024.
- GUTIÉRREZ-BERMÚDEZ, C. del C., MENDIETA-ARAICA, B.G. y NOGUERA-TALavera, Á.J., 2020. Composición trófica de la macrofauna edáfica en sistemas ganaderos en el Corredor Seco de Nicaragua. *Pastos y Forrajes*, vol. 43, no. 1, pp. 32-40. ISSN 0864-0394.
- HANDA, I.T., AERTS, R., BERENDSE, F., BERG, M.P., BRUDER, A., BUTENSCHOEN, O., CHAUVET, E., GESSNER, M.O., JABIOL, J., MAKONEN, M., MCKIE, B.G., MALMQVIST, B., PEETERS, E.T.H.M., SCHEU, S., SCHMID, B., VAN RUIJVEN, J., VOS, V.C.A. y HÄTTENSCHWILER, S., 2014. Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes. *Nature*, vol. 509, no. 7499, pp. 218-221. ISSN 0028-0836. DOI 10.1038/nature13247.
- HÄRDTLE, W., NIEMEYER, M., NIEMEYER, T., ASSMANN, T. y FOTTNER,

- S., 2006. Can management compensate for atmospheric nutrient deposition in heathland ecosystems? *Journal of Applied Ecology*, vol. 43, no. 4, pp. 759-769. ISSN 00218901. DOI 10.1111/j.1365-2664.2006.01195.x.
- HERÁNDEZ-SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, P., 2014. *Metodología de la investigación* [en línea]. 6ta. Mexico: Mc Graw Hill Education. ISBN 9781456223960. Disponible en: <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>.
- HERNÁNDEZ-CHÁVEZ, M., RAMÍREZ-SUÁREZ, W., ABILIO, A. y MARLEN, Z., 2020. Biodiversidad y abundancia de la macrofauna edáfica en dos sistemas ganaderos en Sancti Spíritus, Cuba. *Pastos y Forrajes*, vol. 43, no. 1, pp. 18-25.
- HERNÁNDEZ, B., RAMÍREZ, M., ZURITA, A. y NAVARRO, B., 2020. Biodiversity and abundance of the edaphic macrofauna in two animal husbandry systems in Sancti Spíritus, Cuba. *Scielo*, vol. 43, no. 1, pp. 18-25.
- HORN, H.S., 1974. The Ecology of Secondary Succession. *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 5, no. 1, pp. 25-37. ISSN 0066-4162. DOI 10.1146/annurev.es.05.110174.000325.
- JENNY, H., 2012. *The soil resource: origin and behavior*. S.l.: Springer Science & Business Media. ISBN 1461261120.
- KAHHAT, R., PARODI, E., LARREA-GALLEGOS, G., MESTA, C. y VÁZQUEZ-ROWE, I., 2019. Environmental impacts of the life cycle of alluvial gold mining in the Peruvian Amazon rainforest. *Science of The Total Environment*, vol. 662, pp. 940-951. ISSN 00489697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.01.246.
- KAMAU, S., BARRIOS, E., KARANJA, N.K., AYUKE, F.O. y LEHMANN, J., 2017. Soil macrofauna abundance under dominant tree species increases along a soil degradation gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 112, pp. 35-46. ISSN 00380717. DOI 10.1016/j.soilbio.2017.04.016.
- KARLEN, D.L., MAUSBACH, M.J., DORAN, J.W., CLINE, R.G., HARRIS, R.F. y SCHUMAN, G.E., 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). *Soil Science Society of America Journal*, vol. 61, no. 1, pp. 4-10. ISSN 03615995. DOI 10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x.
- KHALEDIAN, Y., KIANI, F., EBRAHIMI, S., BREVIK, E.C. y AITKENHEAD-PETERSON, J., 2017. Assessment and Monitoring of Soil Degradation during Land Use Change Using Multivariate Analysis. *Land Degradation & Development*, vol. 28, no. 1, pp. 128-141. ISSN 1085-3278. DOI 10.1002/ldr.2541.
- KITAMURA, A.E., TAVARES, R.L.M., ALVES, M.C., SOUZA, Z.M. de y SIQUEIRA, D.S., 2020. Soil macrofauna as bioindicator of the recovery

- of degraded Cerrado soil. *Ciência Rural*, vol. 50, no. 8. ISSN 1678-4596. DOI 10.1590/0103-8478cr20190606.
- LAIRD-HOPKINS, B.C., BRÉCHET, L.M., TRUJILLO, B.C. y SAYER, E.J., 2017. Tree functional diversity affects litter decomposition and arthropod community composition in a tropical forest. *Biotropica*, vol. 49, no. 6, pp. 903-911. ISSN 00063606. DOI 10.1111/btp.12477.
- LARSON, W.E. y PIERCE, F.J., 1991. Conservation and enhancement of soil quality. *Evaluation for sustainable land management in the developing world: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World, Chiang Rai, Thailand, 15-21 September 1991*. Bangkok, Thailand: International Board for Soil Research and Management., pp. 203.
- LAVELLE, P., 1996. Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biology International*, vol. 33, pp. 3-16.
- LAVELLE, P., 1997. Faunal Activities and Soil Processes: Adaptive Strategies That Determine Ecosystem Function. *Avances en la investigación ecológica*. S.l.: s.n., pp. 93-132.
- LAVELLE, P., DECAËNS, T., AUBERT, M., BAROT, S., BLOUIN, M., BUREAU, F., MARGERIE, P., MORA, P. y ROSSI, J.-P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, vol. 42, pp. S3-S15. ISSN 11645563. DOI 10.1016/j.ejsobi.2006.10.002.
- LAZO, M.A. y AGUIRRE, A., 2018. *La macrofauna como indicador de calidad biológica del suelo en diferentes sistemas de producción en la Universidad Nacional Agraria La Molina*. Tesis de pre-grado. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- LEE, K. y FOSTER, R., 1991. Soil fauna and soil structure. *Soil Research*, vol. 29, no. 6, pp. 745. ISSN 1838-675X. DOI 10.1071/SR9910745.
- LFU-MERKBLANTT 3.8/4, 2010. Probenahme von Boden und Bodenluft bei Altlasten und schädlichen Boden- veränderungen für die Wirkungspfade Boden-Mensch und Boden-Gewässer. . Alemania: Stand.
- LINDEN, D.R., HENDRIX, P.F., COLEMAN, D.C. y VAN VLIET, P.C.J., 1994. Faunal Indicators of Soil Quality. *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, pp. 91-106. ISBN 9780891188070.
- LINDENMAYER, D.B., MANNING, A.D., SMITH, P.L., POSSINGHAM, H.P., FISCHER, J., OLIVER, I. y MCCARTHY, M.A., 2002. The Focal-Species Approach and Landscape Restoration: a Critique. *Conservation Biology*, vol. 16, no. 2, pp. 338-345. ISSN 0888-8892. DOI 10.1046/j.1523-1739.2002.00450.x.
- LÓPEZ-MEJÍA, M., MORENO, C.E., ZURIA, I., SÁNCHEZ-ROJAS, G. y ROJAS-MARTÍNEZ, A., 2017. Comparación de dos métodos para analizar la proporción de riqueza de especies entre comunidades: un ejemplo con murciélagos de selvas y hábitats modificados. *Revista*

- Mexicana de Biodiversidad*, vol. 88, no. 1, pp. 183-191. ISSN 18703453. DOI 10.1016/j.rmb.2017.01.008.
- LUKEN, J.O., 1990. *Directing ecological succession*. S.l.: Springer Science & Business Media. ISBN 0412344505.
- MACHADO, D. do N., COSTA, E.C., PEDRON, L., BOSCARDIN, J., MACHADO, L.M., FLECK, M.D. y SANTANA, N.A., 2018. Soil macrofauna as indicator of environmental recovery in a mining area. *Floresta e Ambiente*, vol. 25, no. 4. ISSN 21798087. DOI 10.1590/2179-8087.170769.
- MAGURRAN, A., 1998. *Measuring Biological Diversity*. USA: Blackwell. ISBN 978-0-632-05633-0.
- MAGURRAN, A.E., 1988. Diversity indices and species abundance models. *Ecological Diversity and Its Measurement*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 7-45.
- MAJEED, M.Z., RAZA, A.B.M., AFZAL, M., SALAH-UD-DIN, H., SARWAR, I., YAHYA, M. y SHEHZAD, K., 2018. Differential Impact of Different Land-Use Types on the Population Density and Community Assemblages of Edaphic Macroinvertebrates in District Sargodha, Punjab, Pakistan. *Pakistan Journal of Zoology*, vol. 50, no. 3. ISSN 00309923. DOI 10.17582/journal.pjz/2018.50.3.911.919.
- MARTÍN-REGALADO, N., 2019. Detección de especies indicadoras de condiciones de hábitats. En: C.E. MORENO (ed.), *La Biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio*. Ciudad de México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo/Libermex, pp. 223-235.
- MARTINES, D., 2019. *Relación de la macrofauna con las propiedades del suelo en diferentes sistemas de uso, distrito Monzón, Provincia Huamálies*. Tesis de pre grado. Tingo maria: Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- MARTÍNEZ-RUIZ, C., FERNÁNDEZ-SANTOS, B., PUTWAIN, P.D. y FERNÁNDEZ-GÓMEZ, M.J., 2007. Natural and man-induced revegetation on mining wastes: Changes in the floristic composition during early succession. *Ecological Engineering*, vol. 30, no. 3, pp. 286-294. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2007.01.014.
- MARTINS, L.D.F., DE MORAIS PEREIRA, J., TONELLI, M. y BARETTA, D., 2017. Composição da macrofauna do solo sob diferentes usos da terra (cana-de-açúcar, eucalipto e mata nativa) em Jacutinga (MG). *Revista Agrogeoambiental*, vol. 9, no. 1. ISSN 2316-1817. DOI 10.18406/2316-1817v9n12017913.
- MARX, M.T., YAN, X., WANG, X., SONG, L., WANG, K., ZHANG, B. y WU, D., 2016. Soil Fauna Abundance, Feeding and Decomposition in Different Reclaimed and Natural Sites in the Sanjiang Plain Wetland, Northeast China. *Wetlands*, vol. 36, no. 3, pp. 445-455. ISSN 0277-

5212. DOI 10.1007/s13157-016-0753-8.

- MASERA, O., ASTIER, M. y LÓPEZ RIDAURA, S., 1999. *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS*. S.I.: Mundi-Prensa: GIRA: Instituto de Ecología. ISBN 9687462116.
- MASIN, C.E., CRUZ, M.S., RODRÍGUEZ, A.R., DEMONTE, M.J., VUIZOT, L.A., MAITRE, M.I., GODOY, J.L. y ALMADA, M.S., 2017. Macrofauna edáfica asociada a diferentes ambientes de un vivero forestal (Santa fe, Argentina). *Ciencia del Suelo*, vol. 35, no. 1, pp. 21-33. ISSN 03263169.
- MASTERS, G.J., 2008. Belowground Herbivores and Ecosystem Processes. *Insects and Ecosystem Function*. Germany: Springer, pp. 93-112.
- MATHIEU, J., ROSSI, J.P., MORA, P., LAVELLE, P., MARTINS, P.F.D.S., ROULAND, C. y GRIMALDI, M., 2005. Recovery of soil macrofauna communities after forest clearance in Eastern Amazonia, Brazil. *Conservation Biology*, ISSN 08888892. DOI 10.1111/j.1523-1739.2005.00200.x.
- MCGEOCH, M.A. y CHOWN, S.L., 1998. Scaling up the value of bioindicators. *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 13, no. 2, pp. 46-47. ISSN 01695347. DOI 10.1016/S0169-5347(97)01279-2.
- MCGEOCH, M.A., VAN RENSBURG, B.J. y BOTES, A., 2002. The verification and application of bioindicators: a case study of dung beetles in a savanna ecosystem. *Journal of Applied Ecology*, vol. 39, no. 4, pp. 661-672. ISSN 00218901. DOI 10.1046/j.1365-2664.2002.00743.x.
- MELO, F., BROWN, G., CONSTANTINO, R., LOUZADA, J., LUIZÃO, F. y MORAIS, J., 2009. A importância da meso e macrofauna do solo na fertilidade e como biondicadores. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 35, no. 1, pp. 38-43.
- MENTA, C., 2012. Soil Fauna Diversity - Function, Soil Degradation, Biological Indices, Soil Restoration. En: G.A. LAMEED (ed.), *Biodiversity Conservation and Utilization in a Diverse World*. Croacia: InTech, pp. 59-86. ISBN 978-953-51-0719-4.
- MENTA, C. y REMELLI, S., 2020. Soil Health and Arthropods: From Complex System to Worthwhile Investigation. *Insects*, vol. 11, no. 1, pp. 54. ISSN 2075-4450. DOI 10.3390/insects11010054.
- MINAM(MINISTERIO DEL AMBIENTE), 2014. Guía para el muestreo de suelos. . Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM. Perú - Lima: Dirección General de Calidad Ambiental.
- MORENO, C.E., 2001. *Metodos para medir la biodiversidad*. España: M&T - Manuales y Tesis SEA.
- NANGANOA, L.T., OKOLLE, J.N., MISSI, V., TUECHE, J.R., LEVAI, L.D. y NJUKENG, J.N., 2019. Impact of different land-use systems on soil physicochemical properties and macrofauna abundance in the humid tropics of Cameroon. *Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2019.

ISSN 16877675. DOI 10.1155/2019/5701278.

- NORTCLIFF, S., 2002. Standardisation of soil quality attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 88, no. 2, pp. 161-168. ISSN 01678809. DOI 10.1016/S0167-8809(01)00253-5.
- NUNES, L.A.P.L., ARAÚJO, A.S.F., PESSOA, M.M.C., SOUSA, R.S., SILVA, J.D.C. y MATOS-FILHO, C.H.A., 2019. Edaphic fauna in a vegetation gradient in the Sete Cidades National Park. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 79, no. 1, pp. 45-51. ISSN 1678-4375. DOI 10.1590/1519-6984.174135.
- OLIVEIRA FILHO, L.C.I., BARETTA, D. y SANTOS, J.C.P., 2014. Influência dos processos de recuperação do solo após mineração de carvão sobre a mesofauna edáfica em Lauro Müller, Santa Catarina, Brasil. *Biotemas* [en línea], vol. 27, no. 2, pp. 69. ISSN 2175-7925. DOI 10.5007/2175-7925.2014v27n2p69. Disponible en: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/biotemas/article/view/2175-7925.2014v27n2p69>.
- OTZEN, T. y MANTEROLA, C., 2017. Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. *International Journal of Morphology*, vol. 35, no. 1, pp. 227-232. ISSN 07179502. DOI 10.4067/S0717-95022017000100037.
- PAIS, M.P. y VARANDA, E.M., 2010. Arthropod recolonization in the restoration of a semideciduous forest in southeastern Brazil. *Neotropical Entomology*, ISSN 1519566X. DOI 10.1590/S1519-566X2010000200009.
- PAOLETTI, M.G., FAVRETTO, M.R., STINNER, B.R., PURRINGTON, F.F. y BATER, J.E., 1991. Invertebrates as bioindicators of soil use. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 34, no. 1-4, pp. 341-362. ISSN 01678809. DOI 10.1016/0167-8809(91)90120-M.
- PAZ-FERREIRO, J. y FU, S., 2016. Biological Indices for Soil Quality Evaluation: Perspectives and Limitations. *Land Degradation & Development*, vol. 27, no. 1, pp. 14-25. ISSN 1085-3278. DOI 10.1002/ldr.2262.
- PINO-GOTUZZO, R., 2018. *Metodología de la investigación: elaboración de diseños para contrastar hipótesis*. Lima, Perú: Editorial San Marcos. ISBN 9786123155193.
- PINZÓN, S., ROUSSEAU, G., ROCHA, A., CELENTANO, D., CORRÊA, M. y BRAUN, H., 2015. La macrofauna del suelo como indicadora de degradación de bosques ribereños en la amazonia oriental brasileira. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, vol. 114, no. 1, pp. 49-60. ISSN 1669-9513.
- POHL, M., GRAF, F., BUTTLER, A. y RIXEN, C., 2012. The relationship between plant species richness and soil aggregate stability can depend on disturbance. *Plant and Soil*, vol. 355, no. 1-2, pp. 87-102. ISSN

0032079X. DOI 10.1007/s11104-011-1083-5.

- PULIDO MONCADA, M., GABRIELS, D., CORNELIS, W. y LOBO, D., 2015. Comparing Aggregate Stability Tests for Soil Physical Quality Indicators. *Land Degradation & Development*, vol. 26, no. 8, pp. 843-852. ISSN 10853278. DOI 10.1002/ldr.2225.
- RAHMAN, M., ZHANG, K., WANG, Y., AHMAD, B., AHMAD, A., ZHANG, Z., KHAN, D., MUHAMMAD, D. y ALI, A., 2024. Variations in soil physico-chemical properties, soil stocks, and soil stoichiometry under different soil layers, the major forest region Liupan Mountains of Northwest China. *Brazilian Journal of Biology*, vol. 84, no. February. ISSN 16784375. DOI 10.1590/1519-6984.256565.
- RAMÍREZ-BARAJAS, P.J., SANTOS-CHABLE, B.E., CASANOVA-LUGO, F., LARA-PÉREZ, L., TUCUCH-HAAS, J., ESCOBEDO-CABRERA, A., VILLANUEVA-LÓPEZ, G. y DÍAZ-ECHEVERRÍA, V., 2019. Diversidad de macro-invertebrados en sistemas silvipastoriles del sur de Quintana Roo, México. *Revista de Biología Tropical*, vol. 67, no. December, pp. 1383-1393. ISSN 0034-7744.
- RAMÍREZ, M., 2004. Indicadores de estado: factores biológicos que limitan la calidad agrícola de los suelos. *Primer Taller Nacional sobre indicadores de calidad de suelo. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Palmira, Colombia*.
- ROCHA-NICOLEITE, E., CAMPOS, M.L., COLOMBO, G.T., OVERBECK, G.E. y MÜLLER, S.C., 2018. Forest restoration after severe degradation by coal mining: lessons from the first years of monitoring. *Brazilian Journal of Botany*, vol. 41, no. 3, pp. 653-664. ISSN 0100-8404. DOI 10.1007/s40415-018-0486-4.
- RODRIGUES, R.R., MARTINS, S.V. y DE BARROS, L.C., 2004. Tropical Rain Forest regeneration in an area degraded by mining in Mato Grosso State, Brazil. *Forest Ecology and Management*, vol. 190, no. 2-3, pp. 323-333. ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2003.10.023.
- ROMÁN-DAÑOBEYTIA, F., CABANILLAS, F., LEFEBVRE, D., FARFAN, J., ALFEREZ, J., POLO-VILLANUEVA, F., LLACSAHUANGA, J., VEGA, C.M., VELASQUEZ, M., CORVERA, R., CONDORI, E., ASCORRA, C., FERNANDEZ, L.E. y SILMAN, M.R., 2020. Survival and early growth of 51 tropical tree species in areas degraded by artisanal gold mining in the Peruvian Amazon. *Ecological Engineering*, pp. 106097. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2020.106097.
- ROMÁN-DAÑOBEYTIA, F., HUAYLLANI, M., MICHÍ, A., IBARRA, F., LOAYZA-MURO, R., VÁZQUEZ, T., RODRÍGUEZ, L. y GARCÍA, M., 2015. Reforestation with four native tree species after abandoned gold mining in the Peruvian Amazon. *Ecological Engineering*, vol. 85, pp. 39-46. ISSN 09258574. DOI 10.1016/j.ecoleng.2015.09.075.
- ROSSI, J.P., MATHIEU, J., COOPER, M. y GRIMALDI, M., 2006. Soil macrofaunal biodiversity in Amazonian pastures: Matching sampling with

- patterns. *Soil Biology and Biochemistry*, ISSN 00380717. DOI 10.1016/j.soilbio.2006.01.020.
- ROUSSEAU, G.X., ROGÉRIO, P. y CELENTANO, D., 2014. Macrofauna do solo em uma cronosequência de capoeiras , florestas e pastos no Centro de Endemismo Belém , Amazônia Oriental. , vol. 44, no. 4, pp. 499-512.
- ROUSSEAU, G.X., SILVA, P.R. dos S., CELENTANO, D. y DE CARVALHO, C.J.R., 2014. Macrofauna do solo em uma cronosequência de capoeiras, florestas e pastos no centro de endemismo belém, Amazônia oriental. *Acta Amazonica*, vol. 44, no. 4, pp. 499-512. ISSN 00445967. DOI 10.1590/1809-4392201303245.
- SAJAMI, E., 2017. *Evaluacion De La Regeneracion Natural En Areas Degradadas Por La Minería Aurífera En El Distrito De Laberinto, Tambopata – Madre De Dios*. Tesis de pre grado. Puerto maldonado: Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios.
- SÁNCHEZ-CUERVO, A.M., DE LIMA, L.S., DALLMEIER, F., GARATE, P., BRAVO, A. y VANTHOMME, H., 2020. Twenty years of land cover change in the southeastern Peruvian Amazon: implications for biodiversity conservation. *Regional Environmental Change*, vol. 20, no. 1, pp. 8. ISSN 1436-3798. DOI 10.1007/s10113-020-01603-y.
- SANCHEZ, G., 2017. *Evaluación de la macrofauna del suelo en cuatro diferentes sistemas de uso, el el distrito las Piedras, provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios*. Tesis de pre grado. Puerto maldonado: Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios.
- SANTOS, D.P., SANTOS, G.G., DOS SANTOS, I.L., SCHOSSLER, T.R., NIVA, C.C. y MARCHÃO, R.L., 2016. Caracterização da macrofauna edáfica em sistemas de produção de grãos no Sudoeste do Piauí. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, vol. 51, no. 9, pp. 1466-1475. ISSN 16783921. DOI 10.1590/S0100-204X2016000900045.
- SARDO, P.M. Lo y LIMA, J.S., 2019. Edaphic Macrofauna as a Recovery Indicator of Abandoned Areas of *Corymbia citriodora* in the Southeastern Brazil. *Floresta e Ambiente*, vol. 26, no. 4. ISSN 2179-8087. DOI 10.1590/2179-8087.003119.
- SENAMHI (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ), 2020. Climas del Perú: Mapas de Clasificación Climática Nacional. . Resumen Ejecutivo. Lima - Perú:
- SHAO, Y., ZHANG, W., SHEN, J., ZHOU, L., XIA, H., SHU, W., FERRIS, H. y FU, S., 2008. Nematodes as indicators of soil recovery in tailings of a lead/zinc mine. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 40, no. 8, pp. 2040-2046. ISSN 00380717. DOI 10.1016/j.soilbio.2008.04.014.
- SILVA, R.A., SIQUEIRA, G.M., COSTA, M.K.L., GUEDES FILHO, O. y SILVA, Ê.F. de F. e, 2018. Spatial Variability of Soil Fauna Under Different Land Use and Managements. *Revista Brasileira de Ciência do*

- Solo*, vol. 42. ISSN 1806-9657. DOI 10.1590/18069657rbcs20170121.
- SIMPSON, E.H., 1949. Measurement of Diversity. *Nature*, vol. 163, no. 4148, pp. 688-688. ISSN 0028-0836. DOI 10.1038/163688a0.
- SINGER, M.J. y EWING, S., 2000. *Soil quality*. In *"Handbook of Soil Science"*(ME Sumner, Ed.). 2000. S.I.: CRC Press, Boca Raton, FL.
- SOBERÓN, J., RODRÍGUEZ, P. y VÁZQUEZ-DOMÍNGUEZ, E., 2000. Implications of the Hierarchical Structure of Biodiversity for the Development of Ecological Indicators of Sustainable Use. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 29, no. 3, pp. 136-142. ISSN 0044-7447. DOI 10.1579/0044-7447-29.3.136.
- SQI-SOIL QUALITY INSTITUTE, 1996. Indicators for Soil Quality Evaluation. . Agricultural Research Service. USA: USDA Natural Resources Conservation Service.
- STANTURF, J.A., 2021. Landscape degradation and restoration. En: J.A. STANTURF y M.A. CALLAHAM (eds.), *Soils and Landscape Restoration*. United States: Academic Press, pp. 125-159. ISBN 978-0-12-813193-0.
- STORK, N.E. y EGGLETON, P., 1992. Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*, vol. 7, no. 1/2, pp. 38-47. ISSN 08891893, 14785498.
- SWIFT, M.J., HEAL, O.W. y ANDERSON, J.M., 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems—Blackwell Scientific*. 1979. S.I.: Oxford.
- TULANDE-M, E., BARRERA-CATAÑO, J.I., ALONSO-MALAVER, C.E. y BASTO, S., 2018. Soil macrofauna in areas with different ages after *Pinus patula* clearcutting. *Universitas Scientiarum*, vol. 23, no. 3, pp. 383-417. ISSN 2027-1352. DOI 10.11144/Javeriana.SC23-3.smia.
- VASCONCELLOS, R.L.F., SEGAT, J.C., BONFIM, J.A., BARETTA, D. y CARDOSO, E.J.B.N., 2013. Soil macrofauna as an indicator of soil quality in an undisturbed riparian forest and recovering sites of different ages. *European Journal of Soil Biology*, vol. 58, pp. 105-112. ISSN 11645563. DOI 10.1016/j.ejsobi.2013.07.001.
- VASCONCELOS, W.L.F. de, RODRIGUES, D. de M., SILVA, R.O.C. y ALFAIA, S.S., 2020. Diversity and abundance of soil macrofauna in three land use systems in eastern Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 44. ISSN 1806-9657. DOI 10.36783/18069657rbcs20190136.
- VELÁSQUEZ, M.G., BARRANTES, J.A.G., THOMAS, E., GAMARRA, L.A., PILLACA, M., TELLO, L.D. y BAZÁN, L.R., 2020. Heavy metals in alluvial gold mine spoils in the peruvian amazon. *Catena*, vol. 189, no. May 2019, pp. 104454. ISSN 03418162. DOI 10.1016/j.catena.2020.104454.
- WALKER, K. y ALBERSTADT, L., 1975. Ecological Succession as an Aspect

- of Structure in Fossil Communities. *Paleobiology*, vol. 1, no. 3, pp. 238-257.
- WALKER, L.R. y DEL MORAL, R., 2002. Primary Succession. eLS. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd,
- WALKER, L.R., WARDLE, D.A., BARDGETT, R.D. y CLARKSON, B.D., 2010. The use of chronosequences in studies of ecological succession and soil development. *Journal of Ecology*, vol. 98, no. 4, pp. 725-736. ISSN 00220477. DOI 10.1111/j.1365-2745.2010.01664.x.
- WALMSLEY, A., VACHOVÁ, P. y HLAVA, J., 2019. Tree species identity governs the soil macrofauna community composition and soil development at reclaimed post-mining sites on calcium-rich clays. *European Journal of Forest Research*, vol. 138, no. 4, pp. 753-761. ISSN 16124677. DOI 10.1007/s10342-019-01202-5.
- WU, P. y WANG, C., 2019. Differences in spatiotemporal dynamics between soil macrofauna and mesofauna communities in forest ecosystems: The significance for soil fauna diversity monitoring. *Geoderma*, vol. 337, pp. 266-272. ISSN 00167061. DOI 10.1016/j.geoderma.2018.09.031.
- XIE, H., ZHANG, Y., WU, Z. y LV, T., 2020. A Bibliometric Analysis on Land Degradation: Current Status, Development, and Future Directions. *Land*, vol. 9, no. 1, pp. 28. ISSN 2073-445X. DOI 10.3390/land9010028.
- ZAVALETA, M.A., 2019. *Macrofauna y propiedades físicas y químicas del suelo en cultivos de café del Distrito de Jepelacio-Moyobamba, 2017*. Tesis doctoral. Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- ZERBINO, M.S., ALTIER, N., MORÓN, A. y RODRÍGUEZ, C., 2008. Evaluación de la macrofauna del suelo en sistemas de producción en siembra directa y con pastoreo. *Agrociencia*, vol. XII, no. 1, pp. 44-55.

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de operacionalización de variables

| DEFINICIÓN CONCEPTUAL                                                                                                                                                                                  | DEFINICIÓN OPERACIONAL                                                                                                                                               | DIMENSIONES                        | INDICADORES                                                                                                                                                           | ÍTEMS                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Variable Independiente</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Tiempo de abandono (cronosecuencia)</li> <li>Parámetros del suelo</li> <li>Atributos florísticos (diversidad de flora)</li> </ul> | <b>Variable Independiente</b><br>Identificación de parcelas en total abandono, muestreos del suelo e inventario de la regeneración natural de las especies vegetales | D1: Año de abandono                | Tiempo                                                                                                                                                                | Años                                                                                 |
|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      | D2: Propiedades físicas y químicas | <b>Física:</b> Contenido de área, Arcilla y limo, Contenido de materia orgánica.<br><b>Química:</b> pH, K, P, Cationes cambiables, Capacidad de Intercambio Catiónico | <b>Física:</b> %<br><b>Química:</b> ppm, mg kg <sup>-1</sup>                         |
|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      | D3: Diversidad de flora            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Abundancia</li> <li>Riqueza</li> </ul>                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ind/m<sup>2</sup></li> <li>Ordenes</li> </ul> |
| <b>Variable Dependiente</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Abundancia</li> <li>Biomasa</li> <li>Diversidad</li> <li>Riqueza</li> <li>Grupo funcional</li> <li>Taxon indicador</li> </ul>       | <b>Variable Dependiente</b><br>Muestreo de monolitos de suelo en parcelas con regeneración natural con diferentes tiempos de abandono                                | D1: Abundancia                     | Número de individuos                                                                                                                                                  | Ind/m <sup>2</sup>                                                                   |
|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      | D2: Biomasa                        | Peso de los individuos                                                                                                                                                | g/m <sup>2</sup>                                                                     |
|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      | D3: Diversidad                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Índice de Shannon</li> <li>Índice de Simpson</li> </ul>                                                                        | Adimensional                                                                         |
|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      | D4: Riqueza                        | Numero de ordenes                                                                                                                                                     | Ordenes                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      | D5: Grupo funcional                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Grupos de taxones</li> </ul>                                                                                                   | Ordenes                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      | D6: Taxon indicador del suelo      | Método de especies indicadores                                                                                                                                        | Adimensional                                                                         |

## Anexo 2. Matriz de consistencia

| <b>Título:</b> Macrofauna edáfica como indicador biológico de la recuperación de suelos degradados en una cronosecuencia post-minería aurífera en la Comunidad Nativa de San Jacinto, distrito de Tambopata – Madre de Dios |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Nombre del Tesista:</b> Marx Antony Herrera Machaca                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Problemas                                                                                                                                                                                                                   | Objetivos                                                                                                                                                                 | Hipótesis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Variables/indicadores                                                                                                                                                                                                                                                | Metodología                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| General                                                                                                                                                                                                                     | General                                                                                                                                                                   | General                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Variable Independiente                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Enfoque:</b><br>Cuantitativo<br><br><b>Diseño:</b><br>El diseño de la investigación es no experimental, del tipo transversal<br><b>Nivel:</b><br>Descriptivo y correlacional<br><b>Tipo:</b><br>Aplicada<br><b>Métodos:</b><br>No probabilístico<br><br><b>Técnicas de instrumentos de muestreo</b><br>No probabilístico por conveniencia<br><b>De recolección de datos:</b><br>Para la macrofauna, se utilizó la metodología propuesta por el programa de investigación internacional TSBF.<br>Para el muestreo de suelos se utilizó la metodología propuesta por el MINAN.<br><b>De procesamiento de datos</b><br>Índices de diversidad<br>Método del valor del indicador<br><br><b>De análisis:</b><br>Análisis estadístico descriptivo, exploratorio e inferencia |
| ¿En qué medida la macrofauna edáfica es un buen indicador de recuperación de suelos degradados en una cronosecuencia Post-minería aurífera en la amazonia peruana?                                                          | Evaluar el potencial de la macrofauna edáfica como indicador biológico de la recuperación de suelos degradados en una cronosecuencia Post-minería en la amazonia peruana. | Nuestra hipótesis es que las características físico-químicas del suelo, la diversidad, estructura y composición de la macrofauna edáfica están influenciadas por la vegetación arbórea que se ha establecido luego del abandono de las áreas por la minería aurífera.                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Tiempo de abandono (Cronosecuencia)</li> <li>▪ Parámetros del suelo</li> <li>▪ Atributos florísticos</li> </ul> <b>Dimensiones:</b><br>Años de abandono (parcelas)<br>Propiedades físicas y químicas<br>Diversidad de flora |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Específicos                                                                                                                                                                                                                 | Específicos                                                                                                                                                               | Esperamos que Hymenoptera (Formicidae) e Isoptera sean los grupos taxonómicos más frecuentes de la macrofauna edáfica, debido a que estos grupos son frecuentemente encontrados en áreas con severos impactos en el suelo. Debido a que contribuyen significativamente en áreas impactadas y con poca estabilidad y su variedad en hábitos alimenticios le permite interactuar en diferentes funciones ecológicas. | <b>Indicadores:</b><br><b>Tiempo</b><br><b>Físico-químico:</b> Textura, contenido de materia orgánica, pH, K, P, CC, CIC<br><b>Abundancia y riqueza de la vegetación</b>                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| P.E.1 ¿Cuánto es la abundancia, riqueza, diversidad y biomasa de la macrofauna edáfica en una cronosecuencia Post-minería?                                                                                                  | OE1: Determinar la abundancia, riqueza, diversidad y biomasa de la macrofauna edáfica en una cronosecuencia Post-minería.                                                 | Por otro lado, esperamos un incremento en la diversidad y abundancia y variaciones en la dominancia de grupos funcionales y composición de grupos taxonómicos de la macrofauna edáfica a lo largo de la cronosecuencia después del abandono por actividades mineras.                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| P.E.2 ¿en qué medida influye las características físicas y químicas del suelo en relación con la abundancia, biomasa, riqueza de macrofauna edáfica?                                                                        | OE2: Evaluar la influencia de las características físicas y químicas del suelo en la abundancia, biomasa, riqueza de la macrofauna del suelo.                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| P.E.3 ¿en qué medida influye la vegetación en la abundancia, riqueza y biomasa de la macrofauna edáfica?                                                                                                                    | OE3: Evaluar la influencia de la vegetación en la abundancia, biomasa, riqueza de la macrofauna del suelo.                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Variables dependientes                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| P.E.4 ¿Cómo influencia el tiempo de abandono por actividades mineras en la macrofauna edáfica en comparación con el bosque de referencia?                                                                                   | OE4: Analizar cambios en la macrofauna edáfica a lo largo de un cronosecuencia Post-minería y comparar con un bosque de referencia.                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abundancia</li> <li>▪ Biomasa</li> <li>▪ Diversidad</li> <li>▪ Riqueza</li> <li>▪ Grupo funcional</li> <li>▪ Taxón indicador</li> </ul>                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

|                                                                                                                                    |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>P.E.5 ¿Cuáles son las especies indicadoras de recuperación de áreas degradadas en una cronosecuencia Post-minería aurífera?</p> | <p>OE5: Identificar ordenes de macrofauna indicadoras de calidad de suelo para monitorear la mejoría de los suelos producto de la minería del oro.</p> | <p><b><u>Justificación:</u></b><br/>Estudiar la macrofauna edáfica es relevante porque permite monitorear la perturbación ocurrida en el ambiente y la rehabilitación de suelos contaminados o degradados en un periodo determinado sirviendo como un indicador temprano de degradación o recuperación de los suelos.</p> <p><b><u>Importancia:</u></b><br/>Los resultados del presente estudio proporcionarán información valiosa sobre (1) los cambios en la macrofauna del suelo a lo largo de una cronosecuencia de sucesión secundaria, (2) la calidad de suelo y también permitirá identificar especies indicadoras según la calidad de suelo. Asimismo, los hallazgos del presente estudio podrán ser utilizados como referencia para futuros proyectos de recuperación y rehabilitación de suelos degradados por minería aurífera en la Madre de Dios.</p> | <p><b><u>Dimensiones:</u></b><br/>Abundancia<br/>Biomasa<br/>Diversidad<br/>Riqueza<br/>Grupo funcional<br/>Taxon indicador del suelo</p> <p><b><u>Indicadores:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Número de individuos</li> <li>▪ Peso de los individuos</li> <li>▪ Índice de Shannon y Simpson</li> <li>▪ Numero de ordenes</li> <li>▪ Grupo de ordenes</li> <li>▪ Método de especies indicadores</li> </ul> | <p><b><u>Población:</u></b><br/>Esta conformada por el número total de áreas (parcelas) con regeneración natural con diferentes tiempos de abandono</p> <p><b><u>Muestra:</u></b><br/>La muestra fue de 4 parcelas con diferentes tiempos de abandono con regeneración natural.</p> <p><b><u>Procedimiento:</u></b><br/>Se utilizo la metodología propuesta por el programa de Investigación Internacional "Tropical Soil Biology and Fertility" (TSBF), mediante el estudio de monolitos de suelo, el cual se dividió en 3 estratos (hojarasca, 0 a 10 cm y 10 a 20 cm del suelo). Se utilizo un transecto lineal por cada parcela con regeneración natural (parcela) dentro de cada transecto se ubicó 4 monolitos a cada 5 metros con distancia equidistantes. Para la identificación se solicitó la ayuda de un especialista en entomología, el cual identifico tomando en cuenta solo al nivel taxonómico "orden" para todos los individuos de macroinvertebrados.</p> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Anexo 3. Inventario de especies vegetales en los sitios con diferentes tiempos de abandono.



#### Anexo 4. Identificación de la macrofauna en laboratorio de química



### Anexo 5. Pesado de la biomasa (g)

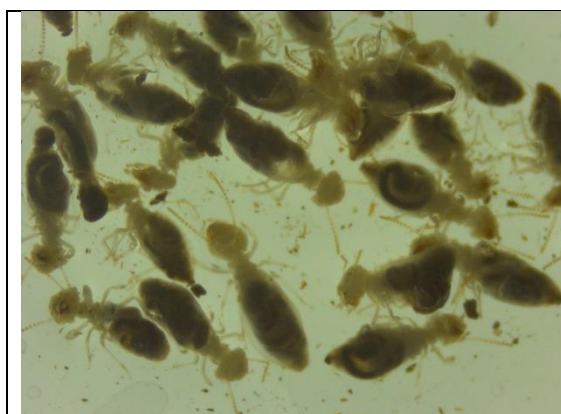


### Anexo 6. Grupos taxonómicos a nivel de Orden



Hymenoptera

Pseudoescorpionida



Isóptera



Blattodea



Gasteropoda



Symphyla

19%

INDICE DE SIMILITUD

18%

FUENTES DE INTERNET

12%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

### FUENTES PRIMARIAS

|   |                                                                                                                                                                                     |    |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | <a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a><br>Fuente de Internet                                                                                                           | 3% |
| 2 | <a href="https://repositorio.unamad.edu.pe">repositorio.unamad.edu.pe</a><br>Fuente de Internet                                                                                     | 2% |
| 3 | <a href="https://scielo.sld.cu">scielo.sld.cu</a><br>Fuente de Internet                                                                                                             | 1% |
| 4 | Mendoza Arviso Maria Silvia. "Los insectos colembolos y la sucesion secundaria del bosque mesofilo de la Reserva de la Biosfera El Cielo Tamaulipas", TESIUNAM, 1995<br>Publicación | 1% |
| 5 | <a href="https://repositorio.una.edu.ni">repositorio.una.edu.ni</a><br>Fuente de Internet                                                                                           | 1% |
| 6 | <a href="https://repositorio.ikiam.edu.ec:8080">repositorio.ikiam.edu.ec:8080</a><br>Fuente de Internet                                                                             | 1% |
| 7 | Ramírez Gutiérrez Arturo. "Densidad de la fauna edáfica como indicador de calidad del suelo en bosques templados y zonas adyacentes en México", TESIUNAM, 2008<br>Publicación       | 1% |