



**Facultad de Ciencias Geológicas**  
**Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA**  
**AMBIENTAL**

**Curso 2023-2024**

USO DE ENMIENDAS ORGÁNICA PARA LA CREACIÓN DE TECNOSUELOS  
COMO ALTERNATIVA PARA LA RESTAURACIÓN AMBIENTAL DE LA  
ESCOMBRERA DE LA MINA SALORO (BARRUECOPARDO, SALAMANCA)

USE OF ORGANIC AMENDMENTS FOR THE CREATION OF TECHNOSOILS AS  
AN ALTERNATIVE FOR THE ENVIRONMENTAL RESTORATION OF THE WASTE  
DUMP OF THE SALORO MINE (BARRUECOPARDO, SALAMANCA)

LUZ ADRIANA RODRÍGUEZ PÉREZ

TUTOR/ES DEL TRABAJO: LUZ GARCIA LORENZO

TUTOR EMPRESA: ISIDORO CARBONELL



# **Facultad de Ciencias Geológicas**

## **Universidad Complutense de Madrid**

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN GEOLOGÍA AMBIENTAL**

**Curso 2023-2024**

**USO DE ENMIENDAS ORGÁNICA PARA LA CREACIÓN DE TECNOSUELOS  
COMO ALTERNATIVA PARA LA RESTAURACIÓN AMBIENTAL DE LA  
ESCOMBRERA DE LA MINA SALORO (BARRUECOPARDO, SALAMANCA)**

**USE OF ORGANIC AMENDMENTS FOR THE CREATION OF TECHNOSOILS AS  
AN ALTERNATIVE FOR THE ENVIRONMENTAL RESTORATION OF THE WASTE  
DUMP OF THE SALORO MINE (BARRUECOPARDO, SALAMANCA)**

**LUZ ADRIANA RODRÍGUEZ PÉREZ**

**TUTOR/ES DEL TRABAJO: LUZ GARCIA LORENZO**

**TUTOR EMPRESA: ISIDORO CARBONELL**

Fdo.:

Fdo.:



## Facultad de Ciencias Geológicas Universidad Complutense de Madrid DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Luz Adriana Rodríguez Pérez (autor/a) con NIE Y9980318B, estudiante de Máster - Geología Ambiental en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2023-2024, como autor/a del trabajo de fin de máster titulado uso de enmiendas orgánica para la creación de tecnosuelos como alternativa para la restauración ambiental de la escombrera de la mina Saloro (Barruecopardo, Salamanca)

y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Luz García Lorenzo

**DECLARO QUE:** El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 17 de Enero de 2024

Fdo.:

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>3. ZONA DE ESTUDIO</b> .....	<b>7</b>
3.1 Geología.....	7
3.4 Hidrogeología .....	7
3.5 Topografía y Relieve .....	8
3.6 Suelos .....	8
3.7 Actividad minera en la zona.....	8
<b>4. MATERIAL Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>10</b>
4.1 Estudio preliminar .....	10
4.2 Material y diseño experimental.....	10
4.3 Evaluación del comportamiento de las mezclas .....	15
4.3.1 Saturación de agua de las muestras .....	15
4.3.2 Riego .....	16
4.3.3 Siembra de centeno .....	16
4.3.4 Muestreo de suelos para análisis de laboratorio .....	17
4.4 Metodología .....	17
4.4.1 Cálculo de la materia orgánica necesaria.....	17
4.4.2 Determinación de la relación C/N .....	18
4.4.3 Medición y seguimiento de los lixiviados.....	18
4.4.4 Medición del crecimiento vegetal.....	19
4.4.5 Análisis de laboratorio .....	19
4.4.6 Metodología estadística .....	20
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
5.1 Suelo objetivo.....	21
5.2 Caracterización fisicoquímica de la fracción mineral-residuo minero. ....	22
5.4. Análisis químico del ensayo de lixiviación de los contenedores.....	31
5.5 Desarrollo vegetal .....	33
5.6 Caracterización físico-química de los suelos.....	34
5.6. Resultados estadísticos .....	37
<b>6. DISCUSION</b> .....	<b>39</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b> .....	<b>42</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>43</b>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 . Mapa de ubicación geográfica de la Mina Saloro .....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2 Ubicación espacial de los contenedores (GRG).....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 Proceso de secado de los materiales orgánicos con humedad.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4 Proceso de elaboración de las mezclas.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5. Mezclas realizadas. Imagen A corresponde a la M2, la imagen B corresponde a la M12, la imagen C a la M8.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6 Muestra vegetación .....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 7 Triangulo de texturas del suelo .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 8 Variación del pH de lixiviados .....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9 Crecimiento vegetal en las muestras M1 Y M2 .....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 10 Crecimiento vegetal pasado 2 meses. Izquierda mezcla M1, derecha varias mezclas .....</i>	<i>33</i>

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Relación C/N por cada enmienda.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 2 Métodos y materiales utilizados por el laboratorio.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 3 Resultados análisis agrícolas .....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 4. Caracterización fracción mineral .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 5. Diferencias entre condiciones del material de base (rechazo de planta) y los objetivos de fertilidad planteados.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 6. Clasificación de los residuos de la zona .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 7. Compuestos orgánicos considerados para las mezclas.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 8. Aportes químicos de los componentes orgánicos .....</i>	<i>26</i>
<i>Tabla 9. Definición de las mezclas .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 10. Resultados calculo materia orgánica requerida .....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 11. Cálculos de cantidades de enmienda por mezcla.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 12. Cantidades necesarias para disponer en el contenedor (GRG).....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 13. Resultados desarrollo Vegetal de las muestras.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 14. Resultados analíticos de suelos .....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 15. Resultados parámetros químicos de las muestras.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 16. Evaluación de la evolución de las mezclas con respecto a los parámetros. ....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 17. Resultados análisis de regresión múltiple .....</i>	<i>38</i>

## **RESUMEN**

El presente trabajo fin de máster tiene como objetivo evaluar, a escala de laboratorio, la formulación de tecnosoles destinados a la rehabilitación ambiental de las escombreras mineras de la mina propiedad de Saloro (Barruecopardo, Salamanca). Este proceso implicó la formulación y creación de una mezcla compuesta por diversos residuos orgánicos e inorgánicos provenientes de actividades agrícolas e industriales locales. El propósito fue generar un sustrato con propiedades físicas, químicas y biológicas similares a las del suelo circundante, contribuyendo así a la restauración ambiental de la zona.

Se utilizó como componente principal de las mezclas el material de rechazo del procesamiento del mineral, dicho material fue mezclado con diferentes enmiendas orgánicas en diferentes proporciones, generando así un conjunto total de 12 mezclas. Cada una de ellas fueron depositada en diferentes contenedores GRG (Gran Recipiente de mercancía a Granel) que fueron adecuados para la siembra, el riego, segado, toma de muestras de suelo y medición de los lixiviados.

Al concluir el periodo de ensayo, se tomaron muestras de suelo de cada uno de los contenedores que fueron caracterizadas geoquímicamente y agronómicamente en un laboratorio externo

Posterior al análisis realizado a partir de los resultados de laboratorio y de campo se obtuvo que la mezcla M11 reúne las características más apropiadas para el desarrollo del suelo, con un mejor desarrollo vegetal aéreo y radicular, así como también un pH más básico, una mayor densidad aparente y baja conductividad eléctrica con respecto a las demás mezclas. Resaltando además la importancia de la adición de estiércoles de vaca y conejo y una fuente fija de materia orgánica como la paja o carbón vegetal, que se mantenga por más tiempo en los suelos para la consecución de los objetivos de fertilidad del suelo resultante, adquiriendo así características de un suelo apto para implementar la cubierta vegetal.

## **ABSTRACT**

The objective of this master's thesis is to evaluate, at a laboratory scale, the formulation of technosols for the environmental rehabilitation of the mining tailings of the mine owned by Saloro (Barruecopardo, Salamanca). This process involved the formulation and creation of a mixture composed of various organic and inorganic wastes from local agricultural and industrial activities. The purpose was to generate a substrate with physical, chemical and biological properties similar to those of the surrounding soil, thus contributing to the environmental restoration of the area.

The main component of the mixtures was the rejection material of the ore processing, said material was mixed with different organic amendments in different proportions, thus generating a total set of 12 mixtures. Each of them were deposited in different GRG (Large Bulk Container) containers that were suitable for planting, irrigation, mowing, soil sampling and leachate measurement.

At the end of the test period, soil samples were taken from each container, for each mixture made, for laboratory analysis. The mixtures were sent to the AQUIMISA laboratory and were analyzed for complete soil, microelements, characterization and fertility.

After the analysis carried out from the laboratory and field results, it was obtained that the M11 mixture has the most appropriate characteristics for soil development, with better aerial and root plant development, as well as a more basic pH, higher apparent density and low electrical conductivity compared to other mixtures. Stressing further the importance of the addition of cow and rabbit manure and a fixed source of organic matter such as straw or charcoal, which is maintained longer in soils for the achievement of the resulting soil fertility objectives, thus acquiring characteristics of a soil suitable for implementing vegetation cover.

## 1. INTRODUCCION

El desarrollo humano ha traído consigo la implementación de nuevas tecnologías para la exploración masiva de los recursos minerales, con el objetivo de suplir las necesidades que se presentan conforme aumenta el desarrollo. Sin embargo, estos avances tecnológicos resultan repercutir negativamente en el medio natural.

Una de las principales industrias de las que depende en gran medida el desarrollo es la industria minera, considerando que se requiere de la extracción de diversos minerales para continuar con los avances tecnológicos que demanda el desarrollo económico y social. Desde sus inicios, la minería ha sido señalada como una de las industrias que mayor repercute en la naturaleza, debido a las actividades de extracción, remoción y alteraciones del paisaje y los ecosistemas. No obstante, en la actualidad debido a la preocupación por la conservación de los medios naturales se han planteado diversas alternativas enmarcadas en normativa que buscan minimizar los impactos que se generan en la industria minera (Vadillo Fernández L & Ayala Carcedo F.J, 2005).

Una de estas medidas es la restauración y rehabilitación minera enmarcada en el ***RD 975/2009 sobre la gestión de los residuos de las industrias extractivas y de protección y rehabilitación del espacio afectado por actividades mineras***, considerando que muchos de los terrenos son abandonados una vez termina la explotación, quedando sustancias químicas y minerales expuestos a condiciones ambientales que pueden genera reacciones físico químicas que resulten en compuestos contaminantes, generando afecciones mayores en el entorno natural(Vadillo Fernández L & Ayala Carcedo F.J, 2005).

Según la Real Academia de la Lengua (2001), el término restaurar hace referencia a “*reparar, renovar o volver a poner algo en el estado o estimación que antes tenía*”. Ahora bien, considerado que la actividad minera implica el movimiento de tierras y modificación total de la zona de explotación no podrá volver a su estado inicial, sin embargo, es posible una aproximación al estado inicial de los terrenos que han sido degradados, por medio de la adecuación del entorno degradado a un estado muy semejante a la inicial.

Lo anterior, resulta ser uno de los objetivos de la restauración, por medio de la recreación antrópica de las condiciones originales que permitan minimizar la degradación y hacer que en estos espacios vuelvan a surgir los ecosistemas con los entornos naturales presentes antes de la intervención minera. Todo lo anterior para lograr un equilibrio entre el desarrollo económicos y la conservación de la naturaleza(Paradelo R, 2013).

Para ello, se debe considerar la implementación de revegetación, siendo uno de los principales protagonistas de la restauración, ya que permite el desarrollo de la actividad biológica del suelo, la reducción y control de la erosión, proporciona estabilidad a terrenos sin consolidar, protección de los recursos hidráulicos y la integración paisajística. Por lo que se requieren de condiciones adecuadas para que las plantas puedan crecer desarrollarse y mantenerse en el tiempo(Paradelo R, 2013).

El suelo actúa de forma importante en la vegetación, siendo la fuente de elementos nutritivos que requieren las plantas, fuente de agua y de oxígeno necesario para la respiración de las raíces y los microorganismos. Existe una gran variedad de suelos, que estarán condicionados por los factores formadores del suelo, variando así las características físico químicas del mismo, sin embargo, esto ocurre en su estado natural, posterior a intervención dichas características también se ven modificadas(Macias V Felipe, 2004).

Por esta razón, al momento de llevar a cabo la restauración se encuentran dificultades para el desarrollo de la cobertura vegetal debido a que el sustrato resultante luego de la explotación minera tiene características físicas, químicas y biológicas alteradas y en ocasiones muchas de estas se han perdido, presentando escasez de materia orgánica, nutrientes y sin actividad biológica, baja proporción de elementos finos que da lugar a texturas gruesas y a una baja estabilidad de los agregados arcillo-húmicos (aunque en ocasiones debido a la influencia antrópica y las mismas condiciones del suelo no existen), valores de pH extremos, existencia de elementos tóxicos y sales en concentraciones excesivamente altas para el desarrollo de la vegetación(Vadillo Fernández L & Ayala Carcedo F.J, 2005).

Lo anterior, da lugar a la necesidad de preparar el terreno para una restauración, para el desarrollo de la vegetación, a partir de métodos, técnicas o tratamientos que contribuyen al mejoramiento de los factores edáficos de los suelos alterados.

Para lograrlo es importante considerar la textura, la estructura, el contenido y disponibilidad de nutrientes para las plantas, las reacciones del suelo (pH) y la profundidad, siendo estos los factores edáficos que tiene influencia en el desarrollo de la cobertura vegetal. Con base en ello, se podrá aportar al medio tratamientos en función a sus necesidades, que mejoren el sustrato, que aporten materia orgánica, regulen el pH, incrementen la disponibilidad macro y micronutriente y favorezca el desarrollo microbiano y las características físicas del suelo(Macias V Felipe, 2009).

Los aspectos anteriormente mencionados fueron considerados en cultural indígenas de la antigüedad en la amazonia de Suramérica para gestionar tierras con baja fertilidad a partir del aporte nutrientes por medio de residuos orgánicos como residuos vegetales, heces de animales y huesos de pescado, restos de cerámicas y la adición de carbón vegetal a la matriz

del suelo, creando lo que se conoce como *terra preta*, definido así por su color oscuro indicador del alto contenido de materia orgánica, cantidad de nutrientes y por ser suelos con alta fertilidad, esto proporciono a las culturas de la amazonia suelos los suficientemente fértiles para el desarrollo de la agricultura, que se mantuvo además en el tiempo e hizo de lo que antiguamente eran tierras poco fértiles el ecosistema natural de la actualidad (Silva LucasCR *et al.*, 2021).

Actualmente, se conoce a esta técnica como tecnosoles denominados de esta forma por ser elaborado por el hombre, a partir del uso de residuos orgánicos e inorgánicos de diversas actividades industriales para la generación de un sustratos con características físico químicas que permitan el desarrollo de procesos edafogénicos, siendo una de las alternativas con auge en los últimos tiempos debido a su utilización en la industria minera, así como en el tratamiento de suelos contaminados (Bolaños Guerrón, 2014).

Para la elaboración de los suelos artificiales, en primer lugar, es importante considerar las condiciones del entorno en el que se aplicaran, el sustrato, la base donde se asentaran los suelos y uso que se le dará al suelo creado, así como también y muy importante los residuos que se encuentren en la zona para reducir costes y mejorar la eficiencia del suelo creado. Los subproductos utilizados deben reunir las siguientes características: no presentar ecotoxicidad y presentar características estructurales y nutricionales para garantizar la calidad del sustrato(Macias V Felipe, 2004).

La aplicación de esta alternativa brinda ventajas económicas a la industria que la implementa, considerando que se harán uso de residuos de diversas industrias para su elaboración, alargando el ciclo de vida de estos y contribuyendo como sumidero de CO<sub>2</sub>(Macias V Felipe, 2004).

Existen muchos casos de éxito de la implementación de tecnosuelos para la restauración minera en España y en el mundo, sin embargo, se resaltan algunos casos que motivaron la investigación. El proyecto tecnosuelos de Gardelegi, donde se implementaron ensayos con tecnosuelos para la rehabilitación de la cantera de Laminoria (Álava), a partir del uso de residuos que permitieran crear un suelo con características adecuadas para la implementación de la cubierta vegetal, que se mantuviera en el tiempo y se integrara con su entorno natural(Ayuntamiento de Vitoria - Gasteiz & Centro de Estudios Ambientales, 2018).

De igual modo, mencionar el proyecto de remediación de mina de Touro, donde se crearon una serie de tecnosoles con componentes y mezclas diferentes para la recuperación de los espacios degradados por la minería(Bolaños Guerrón, 2014).

Adicionalmente, considerando que en la actualidad no existe normativa referente a los tecnosoles, se considera el RD 849/1986 para la comparación de los lixiviados naturales. Además, se deberá considerar normativas vigentes referentes a los residuos industriales, debido a que muchos de los residuos industriales que son usados en la creación de los suelos artificiales pueden suponer riesgos medio ambientales debido a los componentes que puedan conformarlo (Ayuntamiento de Vitoria - Gasteiz, 2018).

## 2. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

El movimiento de tierras es la primera fase en la preparación del terreno para la ejecución de la actividad minera. En primer lugar, se establece la retirada de la primera capa del suelo, que corresponde a la capa de tierra vegetal, es decir, la capa de suelo fértil, con el fin de ser utilizada en la restauración ambiental de las escombreras y de esto dependerá el desarrollo adecuado del sustrato. Sin embargo, a la hora de la ejecución no es posible retirar los 30 cm de cobertura vegetal, donde se encuentra el mayor contenido de materia orgánica y los elementos nutritivos para el desarrollo del suelo, debido a que la maquinaria utilizada no cuenta con esta precisión, tomando capas más infrayacente del suelo que no cuentan con las mismas características fértiles del horizonte A (cobertura vegetal) y al ser mezclados pierden gran parte de las características edáficas de la tierra vegetal.

La mina Saloro cuenta con 4 acopios de suelo vegetal cada uno de ellos cuenta con diferente calidad agronómica y no todos pueden ser utilizados para la restauración ambiental de las escombreras. El acopio 5 considerado como el acopio con mejor calidad tiene un volumen de 64.080 m<sup>3</sup> y los acopios 2,3 y 4 volumen de 122.754 m<sup>3</sup>, sin embargo, la calidad de estos últimos no es adecuada para la restauración, considerando que, la tierra vegetal debe contener condiciones agronómicas mínimas que permitan el desarrollo de la cobertura vegetal.

La problemática radica en que la cantidad de tierra vegetal del acopio 5 no es suficiente para la restauración de las escombreras, ya que se requieren entre 133.492 m<sup>3</sup> y 415.047 m<sup>3</sup> de tierra vegetal adicional. Por ello, se ha planteado como principal alternativa para suplir la escasez de tierra vegetal, crear un suelo artificial con condiciones agronómicas mínimas que permita el desarrollo edáfico y la integración paisajística, utilizando fracciones orgánicas provenientes de residuos orgánicos de diversos tipos, como lodos de EDAR, compost, estiércol, entre otros.

El objetivo principal de este estudio consiste en la evaluación de la eficacia de diversas combinaciones de residuos orgánicos e inorgánicos para la creación de tecnosoles, destinados a ser implementados en escombreras de la mina de wolframio de Barruecopardo, Salamanca. La evaluación de su efectividad se llevará a cabo considerando la obtención de óptimas propiedades físicas, químicas y biológicas, con el propósito de establecer un ambiente edáfico propicio para el desarrollo de comunidades vegetales y microorganismos.

Para alcanzar este objetivo se han llevado a cabo los siguientes objetivos parciales:

- Identificar las características edáficas de los suelos del entorno con el fin de establecer un suelo objetivo para la restauración minera.

- Identificar y seleccionar los materiales orgánicos e inorgánicos disponibles en la zona para la formulación de las mezclas destinadas a la creación del suelo artificial.
- Establecer las mezclas a realizar en función de las características químicas y biológicas de los materiales orgánicos e inorgánicos seleccionados.
- Establecer protocolos experimentales para la elaboración de los suelos artificiales, definiendo las proporciones de los materiales orgánicos a utilizar en cada una de las mezclas.
- Evaluar el desempeño de las mezclas diseñadas a partir de análisis de laboratorio.

### 3. ZONA DE ESTUDIO

El proyecto minero de SALORO se localiza a 2.5 km del municipio de Barruecopardo, en la provincia de Salamanca (España). Está ubicada al noroeste de la provincia de Salamanca y hace parte del Permiso de Investigación Saldeana y administrativamente, la zona de estudio hace parte del partido judicial del municipio de Vitigudino(Saloro SLU, 2019).



Figura 1 . Mapa de ubicación geográfica de la Mina Saloro

### 3.1 Geología

El área de investigación se encuentra en el yacimiento de scheelita de Barruecopardo se enclava en la Zona Centro-Ibérica (ZCI) del Macizo Hespérico. Esta zona se caracteriza por la presencia de macizos graníticos, encajados en una serie metasedimentaria del Paleozoico Inferior. Estos yacimientos están ubicados en el macizo granítico conocido como granito de Barruecopardo. Este granito presenta una facies leucogranítica heterogranular de grano grueso a muy grueso. Adicionalmente, se identifican enclaves decamétricos y hectométricos de rocas metamórficas corneanizadas y otros tipos graníticos en el entorno (IGME *et al.*, 1993)

### 3.4 Hidrogeología

Los depósitos cuaternarios, como aluviales y coluviones, junto con el nivel superficial alterado del sustrato, dan origen a acuíferos libres con porosidad intergranular y permeabilidades medias-bajas debido al alto contenido de fracciones finas. Estos materiales, generalmente

presentan espesores no superiores a 2-3 metros, haciendo que no se posible el abastecimiento subterráneo (Mapa hidrogeológico de Castilla y León, 1995).

Los materiales graníticos presentes en la zona contribuyen a un acuífero complejo con porosidad secundaria por fracturación y comportamiento hidráulico similar, englobándolos dentro del mismo acuífero. La red de fracturas condiciona el funcionamiento del acuífero, siendo más continuo y bien interconectado en las zonas superficiales, asemejándose a un acuífero libre. A mayor profundidad, la red de fracturas disminuye, junto con una menor interconexión, resultando en un compartimentado del acuífero y variaciones bruscas de los niveles piezométricos, comportándose como un acuífero confinado (Mapa hidrogeológico de Castilla y León, 1995).

### **3.5 Topografía y Relieve**

La mina se encuentra situada en la región transfronteriza del centro-oeste de la península Ibérica, en la parte occidental de la penillanura salmantina. Presenta una morfología con suaves ondulaciones y relieves residuales, cañones graníticos y valles encajados, con un microclima mediterráneo que favorece cultivos y una fauna única (Rodríguez Alonso, 1985; Díez Balda, 1986).

### **3.6 Suelos**

Según mapas a escala 1/400.000 del instituto tecnológico agrario de la Junta de Castilla y León (2011) los suelos en la zona de estudio son delgados, pobres en desarrollo y nutrientes, con horizontes eluviales y escaso contenido de materia orgánica. Presentan además una baja retención de agua, permitiendo el drenaje hacia grandes cursos de agua, lo que genera una limitación para el desarrollo de la cobertura vegetal.

En los materiales geológicos que se encuentran en la zona se ha formado suelos de diferente naturaleza, por lo que se encuentran suelos ácidos de tipo Leptosoles y Regosoles eútricos y dístricos formados sobre granitos, cuarcitas y pizarras, adicionalmente se encuentran suelos básicos, formados sobre areniscas y conglomerados, de tipo Luvisoles y cambisoles crómicos y cálcicos.

en la zona de estudio predominan cambisoles húmicos, districos y gleicos (Santos & García, 1993, Trueba et al., 1999)

### **3.7 Actividad minera en la zona.**

La industria minera tiene lugar en Barruecopardo desde 1902. Desde el 2019 ha retomado la producción hasta la actualidad. La mina de Barruecopardo, bajo la dirección de Saloro S.L.,

se dedica a la extracción de wolframio, a través de operaciones mineras y procesos asociados. Este mineral, es caracterizado por su elevado punto de fusión y excepcional resistencia. La mina de Barruecopardo se centra en la extracción y posterior procesamiento de minerales tungstíferos, cuya transformación implica la obtención de concentrados de wolframio.

El método de explotación es a cielo abierto extrayendo la materia bruta para el procesamiento de wolframio y su posterior comercialización. Su área de influencia es el Parque Natural arribes del Duero y las operaciones mineras se encuentran en una Zona de Especial Protección para las Aves ZEPA, perteneciente a la Red Natura 2000, razón por la cual Saloro ha implementado medidas preventivas, correctivas y compensatorias correspondientes a cada afección que puedan generar en el entorno natural.

## **4. MATERIAL Y METODOLOGÍA.**

En base a la revisión bibliográfica de las características físicas, química de los suelos de la zona, así como la identificación y selección de las enmiendas orgánicas utilizar, se llevó a cabo el diseño experimental para la generación del tecnosol.

### **4.1 Estudio preliminar**

Por medio del uso de cartografía de la comunidad de Castilla y León, especialmente mapas de suelos, así como también con los análisis agronómicos realizados al acopio de tierra vegetal con el que cuenta la mina, se identificaron las características edáficas propias de la zona.

Ahora bien, se tiene destinado el uso de un sustrato resultante del procesado del mineral, es decir, un residuo minero con características agronómicas desconocidas, por ello se realizó un muestreo al azar que consistió en la recolección de 5 muestras, cada una de puntos diferentes, con el fin de lograr una homogeneidad. Una vez recolectadas todas las muestras fueron mezcladas en su totalidad en un cubo, de este se extrajeron aproximadamente 3.0 kg y fueron enviadas al laboratorio asociado AGQ para realizar un análisis agronómico e identificar las características fisicoquímicas del sustrato inicial.

Posteriormente, se realizó una recopilación de información de las actividades económicas de la zona, con el fin de identificar los recursos orgánicos e inorgánicos que pudiesen estar disponibles para ser usados en la elaboración del tecnosol. Para ello se tuvo como criterio seleccionar las actividades que se estuvieran dentro de un radio de 50 km de la mina Saloro, de tal forma que, se facilitara la distribución de los recursos y minimizar los costes de traslado.

Una vez identificados los tipos de residuos orgánicos que se encuentran en la zona, se realizó la caracterización de cada uno de ellos, por medio de la recopilación de documentos e información, consultando en artículos científicos, libros, páginas web institucionales y proyectos de investigación.

Seleccionadas las enmiendas orgánicas con mejores características, se procedió al planteamiento de las mezclas, considerando especialmente, los aportes de materia orgánica (materia fresca, materia seca), la relación C/N y el aporte de nutrientes de cada uno de los residuos.

### **4.2 Material y diseño experimental**

Para este estudio se ha trabajado con 12 muestras, codificadas desde M1 a M12, M hace referencia a "mezcla" y el número es la secuencia que va desde el 1 al 12.

La mezcla M1 es la muestra control, en ella se depositó únicamente el material de rechazo de la planta, es decir 900 kg. A partir de la mezcla M2 hasta la M12 se agregaron 900 kg de material de rechazo y se le adicionaron diferentes enmiendas orgánicas en diferentes proporciones generando 12 mezclas diferentes, por tanto, se cuenta con 12 contenedores y en cada uno de ellos se deposita una mezcla diferente.

La parte superior de los GRG fue cortada y retirada, de tal forma que se facilitara el depósito de las mezclas (material de rechazo y enmiendas orgánicas), el riego y el muestreo de suelo al finalizar el periodo del experimento.

Cada uno de los contenedores (GRG) contaba con un sistema de cobertura de salida en la parte inferior, que permitía la captación diaria de los lixiviados. Los GRG's fueron ubicados secuencialmente en línea recta, siguiendo la secuencia numérica del 1 al 12, puestos sobre estivas de madera y aplicando una breve inclinación para facilitar el desagüe y la recolección de los lixiviados.



*Figura 2 Ubicación espacial de los contenedores (GRG).*

Una vez adecuados los contenedores para el depósito de las mezclas se procedió a la selección de las enmiendas orgánicas. Para ello, se tuvo en consideración las actividades económicas de la zona que puedan generar residuos orgánicos, que sirvan de componentes para las mezclas.

En las zonas rurales de Barruecopardo tienen lugar principalmente actividades de agricultura y ganadería, siendo estas las actividades económicas más representativas del lugar, dentro de los cultivos se encuentran cultivo de legumbres y cereales.

Con respecto a la ganadería se encuentran la crianza de ganado bovino, ovino y porcino, así como también se encuentran granja destinadas a la crianza de conejos en la zona de Aldeadavila principalmente. Dichas actividades generan residuos orgánicos con suficiente potencial para la mejora de la calidad de los suelos, gracias al aporte de materia orgánica y macro y micronutrientes.

Se encuentran, además otras industrias que también proporcionan compuestos de interés, como lo son los lodos de depuradora tratados por la EDAR de Salamanca y la industria del carbón con un aporte de carbón vegetal.

Cabe aclarar que, la selección de enmiendas a utilizar se hizo en base a aquellos materiales que contaban con una posibilidad de acceso mayor, es decir, mayor disponibilidad en el tiempo, por lo que las enmiendas utilizadas para la elaboración de las mezclas son las siguientes:

- Estiércol de vaca con paja: Proveniente de granjas aledañas con antigüedad de 3 meses. Se requirieron 2 toneladas del estiércol.
- Estiércol de conejo: Recolectado en granja dedicadas a la crianza de conejos, se utilizó 1 tonelada.
- Paja: Proporcionada por agricultores de la zona, sin embargo, no se encontraba picada, por lo que fue necesario procesarla por medio de una trituradora, Se trituraron 3 pacas de paja.
- Residuo minero: Luego del procesado del wolframio se obtiene un residuo minero en grandes volúmenes, que se quiere ser aprovechado como fracción mineral del tecnosol. De este material fueron necesarios 900 kg para cada uno de los contenedores, para un total de 10800 kg de material.
- Carbón vegetal: Proveniente de una distribuidora de carbón vegetal. Se utilizó un carbón con granulometría de 0-20 mm, conocido como biochar o carbonilla y se solicitó 1 tonelada de carbonilla.
- Lodos de depuradora: Material procesado de la EDAR de Salamanca. Se requirió de 1 tonelada de los lodos.
- Abono verde: Se considero el centeno forrajero como abono verde y fueron necesarias aproximadamente 1200 semillas, depositándose 100 semillas por cada mezcla.
- Cal: Enmienda inorgánica usada como alternativa para la corrección del pH. Fue necesario 2 kg

Cabe aclarar que, las cantidades anteriormente mencionadas son las cantidades totales requeridas para realizar el experimento en su conjunto y no las cantidades agregadas en cada mezcla, pues estas son definidas en función a las necesidades del tecnosol, definidas por

medio de diferentes cálculos posteriormente mencionados y en base a las características químicas de cada una de las enmiendas orgánicas.

Los materiales fueron dispuestos en una zona de acopio. Los estiércoles y lodos de depuradora fueron extendidos sobre una cubierta de plástico para proporcionar el secado del material, se dejaron a la intemperie alrededor de 4 días. Pasados los días fueron recolectado nuevamente y dispuestos en bolsas big bag.



*Figura 3 Proceso de secado de los materiales orgánicos con humedad.*

En base a las características de cada una de las enmienda y las necesidades del suelo que se tiene se definieron los componentes que debían ser agregados a cada una de las mezclas, considerando que, cada mezcla debía llevar dentro de su composición un componente orgánico que aportara materia orgánica, ya que se quiere alcanzar un suelo con un desarrollo biológico y vegetal, aportando además a la mejora de la estructura del suelo, así como, adicionar componentes que aumentaran la capacidad y retención de agua y nutrientes y componentes que mejoraran la capacidad de intercambio catiónico del suelo, con el fin de estabilizar la capacidad nutricional del mismo.

Adicionalmente con el objetivo de corregir el pH y evaluar la necesidad de adición de enmiendas inorgánicas para este mismo fin, se establecido la adición de cal a determinadas mezclas.

Una vez definidas las enmiendas que se agregarían a los contenedores (mezclas), se realizaron cálculos para la estimación de las proporciones de cada una de ellas, para esto seconsideró lo siguiente:

1. La mezcla de las diferentes enmiendas orgánicas debía alcanzar en su conjunto una cantidad establecida, dicha cantidad fue definida en función al cálculo de materia orgánica necesaria.

Se agregaba una cantidad de cada enmienda en función al planteamiento de la mezcla definido anteriormente, de tal forma que se alcanzará la cantidad necesaria, si por algún motivo era superada debían replantearse las cantidades de las enmiendas.

2. Alcanzado la cantidad necesaria en cada mezcla, se identificaba la cantidad en toneladas que se requería, si dichas cantidades eran sobre estimadas se repletaban de nuevo las proporciones, volviendo nuevamente al paso anterior. De tal forma que se logran mezclas con unas proporciones lógicas, considerando que, existen algunas enmiendas que son más fáciles de adquirir y se encuentran con mayor facilidad, mientras que otras a pesar de ser mejores en cuanto a su calidad no serán fáciles de suministrar.
3. Teniendo unas cantidades objetivas de cada una de las enmiendas y cumpliendo con la cantidad mínima de enmiendas que permita alcanza la menos 1% de materia orgánica en el suelo, se identifica ahora, la relación carbono nitrógeno C/N de las mezclas, considerando que cada enmienda tiene su propia relación y al ser mezcladas la relación C/N final cambia, por ello se tenía especial atención en los valores de la relación final.

A partir del procedimiento anterior, se obtuvieron las proporciones adecuadas de cada una de las mezclas. Ahora bien, para facilitar la elaboración de las mezclas se realizó una conversión de masa a volumen por medio del cálculo de densidades de cada una de las enmiendas de tal forma que se facilitara la medición de las cantidades que debían ser agregadas a los respectivos contenedores (GRG).

Se emplearon cubos de 42 litros y se hicieron montículos en el terreno para facilitar la integración de todos los materiales. Para lograr una mejor homogenización de las mezclas se empleó una motoazada.



*Figura 4 Proceso de elaboración de las mezclas.*

Logrando la máxima homogenización de todos los materiales, se depositaron las muestras en los GRG's que fueron debidamente rotulados para la correcta identificación y monitoreo de las mezclas.



*Figura 5. Mezclas realizadas. Imagen A corresponde a la M2, la imagen B corresponde a la M12, la imagen C a la M8.*

### **4.3 Evaluación del comportamiento de las mezclas**

Una vez construidos los contenedores con las distintas mezclas, se han realizado una serie de ensayos con el fin de analizar el comportamiento de las enmiendas, es decir, poder identificar como ha sido el desarrollo del sustrato a partir de la adición de las enmiendas y así identificar cuál de las mezclas realizadas adquiere características edafogénicas que permitan el desarrollo de la cubierta vegetal.

Además, se han plantado un cereal: centeno forrajero, para evaluar las características agronómicas del suelo de cada mezcla.

#### **4.3.1 Saturación de agua de las muestras.**

Para la saturación de cada una de las muestras se consideró como volumen inicial 100 l de agua, que fueron agregados a cada uno de los contenedores (GRG) que contenían las mezclas, de tal forma que, se pudiera considerar el volumen de lixiviados generados al cabo de 24 horas, a fin de estimar de manera relativa la capacidad de retención de cada una de las muestras.

Al cabo de 24 horas fueron medidos los lixiviados generados, su pH, conductividad eléctrica y volumen, con el fin de ser comparados con mediciones posteriores.

### **4.3.2 Riego**

Para establecer la cantidad de riego diario que permitiera la germinación de las semillas de centeno forrajero, se consideró la evapotranspiración mensual de Barruecopardo, siendo de 134 mm/mes, que para el mes de julio y agosto equivale aproximadamente a 5 l/día.

A partir de lo anterior, se estableció que para los meses de julio y agosto (siendo los meses de menor precipitación) agregar 5 l/día de martes a viernes en todas las muestras. Mientras que, los días sábados y domingos no se genera riego alguno, no obstante, a fin de suplir los litros de agua que no han sido agregados durante dos días, se estableció, que los lunes se agregan 30 l, que permiten además identificar el volumen de lixiviados que se generan y poder monitorear la calidad de los lixiviados generados por cada una de las muestras.

Adicionalmente, los riegos se llevaron a cabo en horas de la tarde con el fin de evitar una mayor evapotranspiración y que el agua pudiera ser absorbida por las plantas permitiendo así una mayor retención de agua.

Por otra parte, la llave de los contenedores (GRG) ubicados en la parte inferior, se mantuvo abierta, con el fin de recolectar los lixiviados y evitar que se generen bacterias y algas por causa de la humedad y la traslucidez de los propios contenedores.

### **4.3.3 Siembra de centeno**

Pasados 12 días desde la elaboración de las mezclas, la saturación y riego diario se procedió a realizar la siembra del centeno utilizando la técnica de siembra por voleo, lo que permite dispersar las semillas por todo el GRG de manera aleatoria. La siembra fue realizada el 18 de julio del año 2023.

Para ello, se descapotaron los primeros 2 cm de las mezclas (se almacena en un cubo para el recubrimiento final), se aplica la siembra por voleo con una cantidad de 100 semilla de centeno aproximadamente por cada mezcla (cantidad establecida en base al porcentaje de germinación propio de la semilla de centeno) y finalmente se recubren con el material retirado inicialmente.

Una vez realizada la siembra se continua con el riego diario. El riego se realizó por 2 meses, dado que luego tuvieron lugar precipitaciones constantes.

#### **4.3.4 Muestreo de suelos para análisis de laboratorio.**

Transcurrido el tiempo del experimento se tomaron muestras de suelo de los 20 cm superficiales de cada uno de los depósitos, es decir, se recogieron 12 muestras correspondientes a cada una de las mezclas realizadas. Las muestras fueron secadas y enviadas al laboratorio AQUIMISA S.L.U donde se realizaron análisis de suelo completo el cual incluye los siguientes análisis:

- Caracterización físico-química: pH, conductividad eléctrica, % de saturación, capacidad de intercambio catiónico, carbono orgánico total, materia orgánica total, nitrógeno total, densidad aparente, densidad real.
- Análisis granulométrico: porcentaje de elementos gruesos y porcentaje de arena, limo y arcilla.
- Composición catiónica y aniónica: carbonato, bicarbonato, sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, nitratos, sulfatos y fosfatos.
- Boro soluble y total
- Fósforo de Olsen
- Fracción asimilable por las plantas: Fe, Cu, Mn y Zn tras la extracción DTPA.
- Capacidad de cambio: Na, K, Ca y Mg
- Parámetros relacionados con la disponibilidad de agua para la planta: capacidad de campo y punto de marchitamiento.

#### **4.4 Metodología**

##### **4.4.1 Cálculo de la materia orgánica necesaria.**

Para el cálculo de la cantidad de materia orgánica que se desea alcanzar para el tecnosol, se considerará lo siguiente:

- El aporte de materia orgánica (materia fresca) por parte de los componentes orgánicos.
- La densidad del suelo, que para este caso se considera la densidad del residuo mineral, ya que es considerado como la fracción mineral del suelo objetivo, siendo esta de 1.8 g/cm<sup>3</sup> (valor estándar utilizado en la mina).
- La profundidad del suelo que se quiere alcanzar siendo esta de 20 cm, un valor adecuado para el buen desarrollo del suelo, considerando que es este el espesor del horizonte A sin alteración.
- Fijar un objetivo de materia orgánica.

Para fines de la investigación se fijaron dos objetivos; alcanzar un contenido de materia orgánica del 1 y 2%. Únicamente se realizaron dos mezclas que contenían la cantidad de materia orgánica necesaria para la alcanzar el 2%, ya que, para alcanzar este porcentaje es necesaria una mayor proporción de enmiendas orgánicas lo que genera costes más elevados y se corre el riesgo de que no exista tal cantidad de suministro para la generación del suelo.

El cálculo se realizó a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 1. MO: } 10^4 * D * P * \text{MOx}$$

Donde, MO: Materia orgánica faltante; D: densidad del suelo; P: Profundidad del suelo ; MOx: objetivo de materia orgánica

#### 4.4.2 Determinación de la relación C/N

Para realizar el cálculo del balance de la relación C/N de las mezclas, se debe considerar en primer lugar cada uno de los materiales orgánicos por separado:

$$\text{Ecuación 2. RCN}_P: PE * \text{RCN}_E$$

- $\text{RCN}_P$ : Relación carbono nitrógeno parcial de cada material orgánico.
- PE: Porcentaje del material orgánico con respecto a la mezcla (base 100)
- $\text{RCN}_E$ : Relación C/N de cada una de las enmiendas

Posteriormente, se realiza una sumatoria de todas las relaciones parciales y esta será la relación C/N de la mezcla (Urbano Terrón, 2015)

La relación C/N de cada una de las enmiendas orgánicas, variable utilizada en la ecuación anterior, se muestra a continuación:

Tabla 1 Relación C/N por cada enmienda.

Enmienda orgánica	Relación C/N
Estiércol de vaca +paja	25,0
Estiércol de conejo	27,5
Paja	130,0
carbón vegetal	25,0
Lodos depuradora	4,3

#### 4.4.3 Medición y seguimiento de los lixiviados.

Los lixiviados fueron medidos desde la semana 1, los días martes considerando el calendario de riego establecido en apartados anteriores. Para la recolección de los lixiviados se empelaron cubos de 12 litros aforados proporcionando las medidas del volumen de los

lixiviados. Por su parte, para la medición de los parámetros químicos in situ se utilizó una sonda multiparamétrica que media pH, conductividad eléctrica, DQO, oxígeno y sólidos disueltos.

#### 4.4.4 Medición del crecimiento vegetal

En la semana 10 se tomaron muestras parciales del centeno de la zona central del GRG, considerando que en los bordes al ser traslucido el contenedor puede influir en el desarrollo radicular. La muestra inicial fue pesada en su totalidad, Posteriormente, las plantas fueron limpiadas, retirando parte del suelo adherido a las raíces, esto con el objetivo de pesar y medir el crecimiento aéreo y radicular con mayor precisión.



*Figura 6 Muestra vegetación*

#### 4.4.5 Análisis de laboratorio.

Se procedió a la recolección sistemática de las muestras de suelo en cada uno de los GRG, las cuales fueron preparadas y enviadas al laboratorio asociado AQUIMISA S.L. Lo anterior, con el propósito de determinar las concentraciones de diferentes componentes presentes en el suelo mediante análisis detallados de las características físicas y químicas.

En la siguiente tabla se muestran los métodos y materiales utilizados para la determinación de las concentraciones de cada uno de los parámetros analizados.

Tabla 2 Métodos y materiales utilizados por el laboratorio.

Parámetro	Método	Materiales
pH	Electrodos de pH	Medidor de pH
Conductividad	Medición con un medidor de CE	Medidor de conductividad eléctrica
Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio	Extracción con acetato de amonio, espectroscopía, fotometría de llama.	Espectrofotómetro, fotómetro de llama.
Nitratos	Técnicas como cromatografía iónica o espectroscopía	Cromatógrafo iónico o espectrofotómetro
Nitrógeno total Kjeldahl	Digestión del suelo con ácido sulfúrico concentrado y posterior destilación alcalina para la determinación del nitrógeno total	Sistema Kjeldahl que incluye un bloque digestor, un destilador y un titulador automático.
Fósforo Olsen	Extracción con solución de Olsen (bicarbonato de sodio) seguido de análisis colorimétrico.	Espectrofotómetro o colorímetro.
% Saturación	Cálculo basado en porcentajes de cada base (Calcio, Magnesio, Potasio)	Calculo
Materia orgánica total	Método de Walkley-Black o pérdida por ignición.	Horno de ignición
Densidad aparente	Cilindro volumétrico o método del anillo	Cilindro volumétrico, anillo volumétrico
Capacidad de campo y Punto de marchitamiento	Gravimetría para determinar la capacidad de campo y el punto de marchitamiento	Equipos de medición de humedad, como una estufa.
Granulometría	Análisis granulométrico mediante tamizado	Tamices, agitador mecánico, balanza analítica.

#### 4.4.6 Metodología estadística

Para el procesamiento y análisis de la información obtenida a partir de las mediciones realizadas en campo, así como también, los análisis de laboratorio se hizo uso del programa Excel permitiendo el registro y la elaboración de graficas para el posterior análisis estadístico de la información recolectada.

El método estadístico utilizado para el análisis de los resultados de suelos aportados por el laboratorio fue regresión lineal múltiple, con el fin de relacionar los parámetros seleccionados con los materiales agregados en la muestra.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Suelo objetivo

Para la definición del suelo que se quiere alcanzar para la restauración de las escombreras mineras, se han considerado dos aspectos, el primero de ellos se basó en el análisis agrícola de una muestra de suelo del acopio de tierra vegetal de mejor calidad agronómica con el que cuenta la mina, que define las características edáficas del área explorada. En segundo lugar, se consideró la información proporcionada por los mapas de suelos de la Comunidad de Castilla y León como la clase textural del suelo, el pH y el contenido de materia orgánica.

Con base en lo anterior, se realizó una comparación entre los parámetros identificados y así se definieron los valores de cada uno de los parámetros que se quieren alcanzar con el tecnosol a crear. Considerando que, para lograr una adecuada restauración de espacios degradados se deben considerar las condiciones del entorno.

En la siguiente tabla se muestran la recopilación de la información consultada referente a las características de los suelos de la zona. Los “*valores zonales*” mostrados en la tabla hacen referencia a los valores reportados en la cartografía de los suelos de Castilla y León, mientras que los valores representados en la casilla de “*valores Acopio 5*” son los valores obtenidos a partir del análisis agronómico realizado a las muestras de suelo. Por su parte en la casilla denominado “*valores de suelo objetivo*” se muestran los valores que se desean alcanzar en cada uno de los parámetros.

Tabla 3 Caracterización físico química de los suelos.

Fertilidad física				
Parámetro	Unidades	Valores zonales	Valores Acopio 5	Valores suelos objetivo
		Valor	Valor	Valor
Clase textural	-	Franco arenosa	Franca	Franco arenosa
Arcilla	%	<10	10.4	10-20-
Limo	%	20-40	38.6	30-40
Arena	%	51-70	51	50-60
Arena Fina	%	-	37.9	-
Arena Gruesa	%	-	13.1	-
Fertilidad				
CE	μS/cm	-	71.7	<400
pH	Unidades de Ph	6.9-7.1	4.77	>6
Materia orgánica	%	2	1.61	1.5
Nitrógeno total	mg/kg	-	919	>1000
Fosforo disponible	mg/kg	18-30	57.4	20-40
Caliza activa	% CaCO <sub>3</sub>	-	<0.500	<6
Calcio disponible	meq/100 g	-	1.99	<4000
Mg	meq/100 g	-	0.51	>80
k	meq/100 g	130-200	0.11	200-300
Na	meq/100 g	-	<0.05	<150
Relación C/N		-	10.2	20-40

Es importante mencionar que, los valores recolectados a partir de revisión de los mapas de suelos de la comunidad de Castilla y León no son valores específicos de la zona de estudio, dado que, han sido estudios realizados por la comunidad de Castilla y León en zonas aledañas

a la mina, por lo que los datos representados en el mapa han sido interpolados, mostrando información general de los suelos de la zona.

Para la definición del suelo objetivo se han tenido en consideración tanto los valores de la zona en general como los del acopio, estableciendo diferencias entre ellos y seleccionando el valor que mejor se ajuste a las necesidades de suelo que se quiere alcanzar.

Con respecto al pH, los valores de pH de la zona se encuentran en un rango de 6.9-7.1 y los valores del acopio tienen un pH de 4.7, lo cual es considerado como un pH ácido que podría repercutir en el desarrollo de la cobertura vegetal, por lo que se ha definido un pH >6, con el fin de evitar problemas de acidez del suelo.

Por otra parte, con respecto al contenido de materia orgánica, la zona cuenta con un porcentaje de 2% de MO, mientras que, el acopio presenta un 1,6% de MO, por esta razón, se ha establecido un valor objetivo de materia orgánica del 1,5%, que si bien no se encuentra dentro del rango es considerado como un punto de partida para el desarrollo de suelo, considerando que, una vez se alcance este mínimo porcentaje de MO en la fase inicial del suelo, conforme pasa el tiempo y se desarrolle la cobertura vegetal, el suelo podrá adquirir un mayor porcentaje de materia orgánica.

En cuanto al contenido de nutrientes del suelo, se han considerado valores más elevados con respecto a los valores reportados en el análisis agronómico del acopio de tierra vegetal, ya que, se quiere alcanzar un suelo apto para establecer cobertura vegetal, por lo que deberá contener estos nutrientes básicos requeridos por las plantas para su desarrollo, por esta razón los valores objetivos son basados en los contenidos mínimos de macro y micronutrientes característicos de un suelo agrícola.

Para la definición de la relación carbono nitrógeno se definió un valor mayor al que se encuentra en el acopio (entre 20:1 y 40:1), considerando que, conforme avanza la evolución del suelo esta relación disminuye a causa de la actividad microbiana, por lo que conforme avance la evolución del suelo se podrá alcanzar la relación C/N propia de la zona.

## **5.2 Caracterización fisicoquímica de la fracción mineral-residuo minero.**

Durante el procesamiento del wolframio se genera como residuo minero un material con características arenosas, considerado como un estéril. Dicho material se genera en grandes cantidades y actualmente se deposita en las escombreras extendiéndolo como base previa a la extensión de la tierra vegetal. No obstante, se ha planteado que dicho material puede ser aprovechado para el tecnosol.

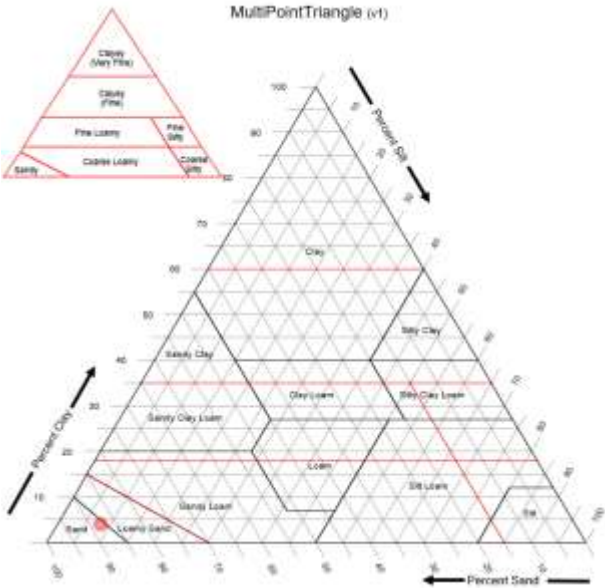
Para ello, se ha realizado un análisis agronómico a fin de identificar las características del sustrato. En la tabla 4 se muestran los resultados de las pruebas analíticas realizadas al residuo minero resultante del procesado del wolframio.

Tabla 4. Caracterización fracción mineral.

Fertilidad física		
Parámetro	Fracción mineral	
	Unidades	Parámetro
Clase textural		Arenosa
Arcilla	%	4
Limo	%	8
Arena	%	88
Arena Fina	%	-
Arena Gruesa	%	-
Fertilidad		
CE	μS/cm	193
pH	Unidades de Ph	5.36
Materia orgánica	%	<0.17
Nitrógeno total	mg/kg	<155
Fosforo disponible	mg/kg	<9.80
Caliza activa	% CaCO3	<0.500
Calcio disponible	meq/100 g	2.04
Magnesio	meq/100 g	0.45
Potasio	meq/100 g	0.07
Sodio	meq/100 g	0.12
Relación C/N		<0.01

Con respecto a los parámetros de textura del sustrato (residuo minero) en el siguiente triángulo de textura (ver figura 7) se representan los datos de arcilla, arena y limo mostrados en la tabla anterior, donde se aprecia que la clase textural del residuo minero es arenosa.

Figura 7 Triangulo de texturas del suelo.



Al presentar una clase textura arenosa, debido al alto contenido de arenas la capacidad de retención del suelo será baja, lo que quiere decir que no podrá retener la materia orgánica y los nutrientes necesarios para el desarrollo de la cobertura vegetal, ni podrá almacenar la cantidad de agua requerida por las plantas, siendo además un material propenso a ser erosionado, lo que afectaría las labores de restauración de las escombreras.

Ahora bien, con respecto a los parámetros asociados la fertilidad química del sustrato analizado, se puede observar que presenta un pH ácido que podría generar problemas de acidez del suelo y una conductividad eléctrica elevada, la cual puede afectar en el crecimiento vegetal, ya que puede interferir en la absorción de agua por parte de las raíces, así como también, presentar problemas de fitotoxicidad.

En cuanto al contenido de materia orgánica y los nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal (N, P, K, Ca, Mg, Na) tal como se observa en la tabla 5, las concentraciones se encuentran muy por debajo a las concentraciones propias de la zona, así como también, inferiores a los valores objetivos de fertilidad establecidos, por lo que, se establece que el sustrato inicial no cuenta con características agronómicas para establecer cobertura vegetal.

*Tabla 5. Diferencias entre condiciones del material de base (rechazo de planta) y los objetivos de fertilidad planteados.*

<b>CONTENIDO DE NUTRIENTES Y MO DEL SUELO</b>			
	<b>Actual</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Déficit</b>
<b>MO (%)</b>	0	1.5	1.5
<b>N (mg/kg)</b>	0	1000	1000
<b>P (mg/kg)</b>	0	30	30
<b>Ca (meq/100g)</b>	2.04	19	16.96
<b>K (mg/kg)</b>	0.07	250	249.93
<b>Mg (meq/100g)</b>	0.45	0.8	0.35
<b>Na (meq/100g)</b>	0.12	0.65	0.53

Considerando el déficit de MO y nutrientes del sustrato mostrados en la tabla anterior, es necesario mejorar las características edáficas del sustrato, por medio del uso de enmiendas orgánicas que mejoren las características físicas del sustrato a partir del aporte de nutrientes y materia orgánica.

Con base en lo anterior, se plantea el uso de residuos agrícolas e industriales que se encuentren disponibles en un radio de 50 km de la mina considerados como posibles componentes a utilizar en la mezcla que permitan mejorar las condiciones agronómicas del sustrato.

En la siguiente tabla 6, se muestran los residuos mineros, industriales, agrícolas y ganaderos identificados en la zona.

Tabla 6. Clasificación de los residuos de la zona.

Tipo de residuo	Residuos	
<b>Residuos mineros</b>	Fracción mineral del suelo	
<b>Residuos agrícolas</b>	Cascaras de almendras	
	Restos de podas	
	Paja	
	Abono verde	Leguminosas
		Gramíneas
	Biomasa forestal	
<b>Residuos ganaderos</b>	Estiercol	Vaca
		Oveja
		Conejo
	Purines	
<b>Residuos Industriales</b>	Lodos depuradora	
	Carbón vegetal (Biochar)	
	Fertilizantes procedentes de residuos compostados	
	Fertilizantes procedentes de residuos vegetales compostados	

Para llevar a cabo la selección de los residuos que se podría utilizar en las mezclas se consideraron el acceso a los componentes, ya que se requiere de materiales que estén disponibles en grandes cantidades y disponibles en cualquier temporada del año.

Se han descartado la cáscara de almendra, los restos de podas y la biomasa forestal considerando que, se requieren de grandes cantidades y de un suministro continuo del material, por ejemplo, en el caso de las cáscaras de almendra su disposición será únicamente durante las temporadas de cosechas, por esta razón, se ha seleccionado como residuos agrícolas la paja, al encontrarse en grandes cantidades y durante diferentes épocas del año y el abono verde que dependerá del enterramiento del centeno forrajero antes de que florezca, liberando nutrientes de nuevo al suelo.

Con respecto a los residuos ganaderos se ha descartado los purines debido al difícil manejo del purín, especialmente por tratarse de un material con una elevada carga de contaminantes asociados a nitratos, que pueden contaminar las aguas subterráneas, razón por la cual al ser usados como enmienda orgánica en el suelo se debe controlar el uso y gestionarlos con un riguroso control administrativo.

El estiércol de oveja, por su parte, a pesar de ser uno de los mejores estiércoles por sus características físicas y el gran aporte de nutrientes y materia orgánica, no se encuentran las cantidades requeridas en las zonas circundantes, considerando que no son muchas las granjas que se dedican a la crianza de ovejas, siendo este un condicionante para el uso posterior.

Por otra parte, en cuanto a los residuos industriales se han seleccionado los lodos de depuradora, ya que se cuenta con un suministro constante y en las cantidades necesarias, descartando los fertilizantes de residuos compostados por los temas relacionados a los costes.

Con base en lo anterior, a continuación, se muestran los residuos que han sido seleccionados como componentes orgánicos para la elaboración del tecnosol (ver tabla 7). Se relacionan con el origen y el lugar de suministro.

Tabla 7. Compuestos orgánicos considerados para las mezclas.

Tipo de Enmienda		Origen	Lugar
<b>Residuos agrícolas</b>	Paja	Ganadero de la zona	Barruecopardo
<b>Residuos ganaderos</b>	estiércol de vaca+paja	Ganadero de la zona	Barruecopardo
	estiércol de Conejo	Granja de conejos	Aldeadávila
<b>Residuos Industriales</b>	Lodos depuradora	EDAR de Salamanca	Salamanca
		Planta de Biogas Genia Global	Ledesma
<b>Adicionales</b>	Carbon vegetal	Planta procesadora de leña, carbones adelio	Salamanca

Una vez seleccionados los componentes orgánicos a adicionar en la mezcla para la generación del tecnosol se identificaron los contenidos porcentuales de MO, N, P, K de cada una de las enmiendas por medio de la aplicación web *Sativum* (desarrollador informático del instituto tecnológico agrario de Castilla y León), con el fin de identificar los aportes nutricionales de cada componente, los resultados son los siguientes:

Tabla 8. Aportes químicos de los componentes orgánicos.

Tipo de Enmienda		%			
		MO	N	P	K
<b>Residuos agrícolas</b>	Paja	0,15	0,6	0,2	1
<b>Residuos ganaderos</b>	estiércol de vaca+paja	0,40	0,24	0,23	0,12
	estiércol de Conejo	0,40	0,57	1,14	0,56
<b>Residuos Industriales</b>	Lodos depuradora	0,64	4,9	7,56	0,55
<b>Adicionales</b>	carbón vegetal	0,45	0,6	0,5	0,5

Como se puede apreciar en la tabla 8, la enmienda orgánica con mayor aporte tanto de materia orgánica como de nutrientes son los lodos de depuradora, con un contenido de 64% de MO, seguido del carbón vegetal con 45% de MO y el estiércol de conejo y de vaca con paja con un contenido de 40% de MO, sin embargo, en lo referente a nutrientes el estiércol de conejo tiene un mayor contenido de N, P y K que el estiércol de vaca con paja. Finalmente,

la enmienda con menor aporte de MO (15%), pero gran aporte de N es la paja, siendo este un componente a considerar en la relación C/N del sustrato.

Con base en lo anterior se estableció que cada una de las mezclas debía contener como mínimo un componente que aportase un porcentaje elevado de materia orgánica, así como también adicionar bien sea o paja o carbón vegetal considerando el gran aporte de N de estos componentes, no obstante, también se deben considerar la disponibilidad y costes de los componentes.

Se definió 1 muestra control denominada como M1, y 11 mezclas denominadas como M2 hasta M12 a las cuales se les variaban los componentes orgánicos, con el fin de observar el comportamiento y la interacción entre las diferentes enmiendas.

En la tabla 9, se pueden apreciar las mezclas que han sido definidas, con su respectiva descripción.

*Tabla 9. Definición de las mezclas.*

ID mezcla	Definición	Descripción
<b>M1</b>	Material de rechazo de la planta	Blanco operacional
<b>M2</b>	Material de rechazo de la planta +Estiércol de vaca con paja	Se busca conocer el funcionamiento con un único componente orgánico
<b>M3</b>	Material de rechazo de la planta + Estiércol de vaca con paja + estiércol de conejo	Un aporte proporcional de cada uno de los estiércoles, es decir, 50/50
<b>M4</b>	Material de rechazo de la planta +Lodos de depuradora+ paja	Se considera la relación C/N de los lodos, por lo que se requiere un aumento a partir de la paja
<b>M5</b>	Material de rechazo de la planta +Estiércol de vaca con paja +estiércol de conejo +paja +carbón vegetal	Se busca conocer la interacción de los estiércoles con el carbón vegetal
<b>M6</b>	Material de rechazo de la planta + lodos de depuradora+ paja+ carbón vegetal	Identificar la evolución del suelo, a partir de la interacción de los lodos de depuradora con el carbón vegetal.
<b>M7</b>	Material de rechazo de la planta + Estiércol de vaca con paja+ estiércol de conejo+ paja +lodo de depuradora +carbón vegetal	Integración de todos los componentes orgánicos.
<b>M8</b>	Material de rechazo de la planta + Estiércol de vaca con paja+ estiércol de conejo+ paja +lodo de depuradora +carbón vegetal (3)	Se le aumenta la proporción en cantidad al carbón vegetal a fin de evaluar la efectividad de este en la estructura del suelo, la capacidad de retención hídrica y la capacidad de intercambio catiónico
<b>M9</b>	Material de rechazo de la planta + Estiércol de vaca con paja +estiércol de conejo+ paja +carbón vegetal+ cal	Mezclas duplicadas de la M5 (M9), M6 (M10), M7 (M11) y M8 (M12), con adición de cal como componente inorgánico que permita la corrección del pH.
<b>M10</b>	Material de rechazo de la planta + lodos de depuradora+ paja+ carbón vegetal + cal	

ID mezcla	Definición	Descripción
M11	Material de rechazo de la planta + Estiércol de vaca con paja+ estiércol de conejo+ paja +lodo de depuradora +carbón vegetal +cal	
M12	Material de rechazo de la planta + Estiércol de vaca con paja +estiércol de conejo + paja + lodo de depuradora +carbón vegetal (3) +cal	

Las mezclas M9, M10, M11, M12 son duplicadas de las mezclas M5, M6, M7, M8, respectivamente, con una adición de cal de 1250 kg/ha (valor estándar para suelos arenosos a fin de aumentar el pH una unidad), para la corrección del pH, esto con el fin de observar si existen diferencias en cuanto a la adición o no de cal en el sustrato.

Adicionalmente, las mezclas M8 y M12 fueron seleccionadas como las mezclas con un aumento en la cantidad de enmienda orgánica para alcanzar un 2% en el contenido de materia orgánica, considerando que, son las mezclas que reúnen todos los componentes y con mayores proporciones de carbón vegetal, por lo que se esperaba que fueran las mezclas con mayores aportes de MO, debido a la carga orgánica que la conforma.

Ahora bien, en el apartado anterior se definieron los componentes que llevaría cada mezclas, sin embargo no se contemplaron las proporciones de cada uno de ellos, para lograrlo, en primer lugar, se realizó el cálculo de materia orgánica necesaria, considerando que el sustrato inicial (residuo minero ) no contenía materia orgánica, para ello se tuvo en cuenta la densidad del suelo, la profundidad del suelo referente al horizonte A y el porcentaje de MO objetivo y a partir de la integración de estas variables se obtuvo lo siguiente (ver tabla 10):

Tabla 10. Resultados calculo materia orgánica requerida.

Objetivo	Densidad Suelo (T/m3)	Profundidad Suelo (m)	MO faltante	Cant MO (T/ha)
1%	1.8	0.2	0.01	36
2%			0.02	72

La tabla 10 indica que, para alcanzar el 1% de materia orgánica se deben añadir una cantidad de enmiendas que en su conjunto aporten 36 T/ha de materia orgánica y para alcanzar un 2% se requiere un aporte de 72 T/ha de materia orgánica por parte de las enmiendas agregadas. Estas serán las cantidades de materia orgánica objetivo consideradas para establecer las proporciones de cada una de las enmiendas en las mezclas.

Con base a lo anterior, así como también considerando las cantidades en T/h que se requieren y la relación C/N se definieron las proporciones de cada una de las mezclas, las cuales se pueden observar en la siguiente tabla (ver tabla 11):

Tabla 11. Cálculos de cantidades de enmienda por mezcla.

<b>MEZCLA 2</b>			
<b>1% MO</b>	<b>Cant Enmienda (T/h)*</b>	<b>Cantidad Tmh</b>	<b>C/N</b>
<b>Estiércol de vaca+paja</b>	36	360	25
<b>Residuo minero</b>	3600		
<b>TOTAL</b>	36	360	25

<b>MEZCLA 3</b>			
<b>1% MO</b>	<b>Cant Enmienda (T/h)*</b>	<b>Cantidad Tmh</b>	<b>C/N</b>
<b>Estiércol de vaca+paja</b>	18	180	13
<b>Estiércol de conejo</b>	18	90	7
<b>Residuo minero</b>	3600		
<b>TOTAL</b>	36	270	19

<b>MEZCLA 4</b>			
<b>1% MO</b>	<b>Cant Enmienda (T/h)*</b>	<b>Cantidad Tmh</b>	<b>C/N</b>
<b>Paja</b>	2	15	5
<b>Lodos depuradora</b>	34	134	2
<b>Residuo minero</b>	3600		
<b>TOTAL</b>	36	148	7

<b>MEZCLA 5</b>			
<b>1% MO</b>	<b>Cant Enmienda (T/h)*</b>	<b>Cantidad Tmh</b>	<b>C/N</b>
<b>Estiércol de vaca+paja</b>	16	160	11
<b>Estiércol de conejo</b>	16	80	6
<b>Paja</b>	2	15	5
<b>Carbón vegetal</b>	2	5	0
<b>Residuo minero</b>	3600		
<b>TOTAL</b>	36	260	23

<b>MEZCLA 6</b>			
<b>1% MO</b>	<b>Cant Enmienda (T/h)*</b>	<b>Cantidad Tmh</b>	<b>C/N</b>
<b>Paja</b>	2	15	5
<b>Carbón vegetal</b>	2	5	0
<b>Lodos depuradora</b>	32	8	0
<b>Residuo minero</b>	3600		
<b>TOTAL</b>	36	28	6

<b>MEZCLA 7</b>			
<b>1% MO</b>	<b>Cant Enmienda (T/h)*</b>	<b>Cantidad Tmh</b>	<b>C/N</b>
<b>Estiércol de vaca+paja</b>	7	70	5
<b>Estiércol de conejo</b>	7	35	3
<b>Paja</b>	2	15	5
<b>Carbón vegetal</b>	2	5	0
<b>Lodos depuradora</b>	18	71	1
<b>Residuo minero</b>	3600		
<b>TOTAL</b>	36	196	14

MEZCLA 8			
2% MO	Cant Enmienda (T/h)*	Cantidad Tmh	C/N
Estiércol de vaca+paja	13	130	9
Estiércol de conejo	13	65	5
Paja	4	30	11
Carbón vegetal	6	15	1
Lodos depuradora	36	142	2
Residuo minero	3600		
<b>TOTAL</b>	72	381	27

Ahora bien, en los cálculos mostrados en el apartado anterior se calculan cantidades a agregar en una hectárea del terreno, sin embargo, al tratarse de una prueba a escala laboratorio se consideraron cantidades menores en función del volumen de los contenedores, que a partir de los cálculos correspondientes se obtuvo lo siguiente:

Tabla 12. Cantidades necesarias para disponer en el contenedor (GRG).

Cantidad para alcanzar el 1% MO					
ID mezcla	Enmienda orgánica	Cantidad MO (T/h)	Cantidad (T/h) mh	Cantidad (Kg) mh	Acumulado (kg)
M1	Material de rechazo	3600		900	900
M2	estiércol de vaca con paja	36	360	90	990
M3	estiércol de vaca con paja	18	180	45	967,5
	estiércol de conejo	18	90	22,5	
M4	Lodos depuradora	34	133,6	33,4	937,1
	Paja	2	14,8	3,7	
M5	estiércol de vaca con paja	16	160	40	964,9
	estiércol de conejo	16	80	20	
	paja	2	14,8	3,7	
	carbón vegetal	2	4,9	1,2	
M6	lodos de depuradora	32	125,8	31,4	936,3
	paja	2	14,8	3,7	
	carbón vegetal	2	4,9	1,2	
M7	estiércol de vaca con paja	7	70	17,5	948,9
	estiércol de conejo	7	35	8,8	
	paja	2	14,8	3,7	
	lodo de depuradora	18	70,8	17,7	
	carbón vegetal	2	4,9	1,2	
M9	estiércol de vaca con paja	16	160	40	965,28
	estiércol de conejo	16	80	20	
	paja	2	14,8	3,7	
	carbón vegetal	2	4,9	1,2	
	cal	0,38	0,38	0,38	
M10	lodos de depuradora	32	125,8	31,4	936,68
	paja	2	14,8	3,7	
	carbón vegetal	2	4,9	1,2	
	cal	0,38		0,38	
M11	estiércol de vaca con paja	7	70	17,5	949,28

<b>Cantidad para alcanzar el 1% MO</b>					
ID mezcla	Enmienda orgánica	Cantidad MO (T/h)	Cantidad (T/h) mh	Cantidad (Kg) mh	Acumulado (kg)
	estiércol de conejo	7	35	8,8	
	paja	2	14,8	3,7	
	lodo de depuradora	18	70,8	17,7	
	carbón vegetal	2	4,9	1,2	
	<b>cal</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	
<b>Cantidad para alcanzar el 2% MO</b>					
M8	estiércol de vaca con paja	13	130	32,5	995,3
	estiércol de conejo	13	65	16,3	
	paja	4	29,6	7,4	
	lodo de depuradora	36	141,5	35,4	
	carbón vegetal (X3)	6	14,8	3,7	
M12	estiércol de vaca con paja	13	130	32,5	995,68
	estiércol de conejo	13	65	16,3	
	paja	4	29,6	7,4	
	lodo de depuradora	36	141,5	35,4	
	carbón vegetal (X3)	6	14,8	3,7	
	<b>cal</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	<b>0,38</b>	

#### 5.4. Análisis químico del ensayo de lixiviación de los contenedores

Como se puede observar en la figura 8 la adición de enmiendas orgánicas al sustrato inicial (residuo minero) mejora el pH, arrojando lixiviados con pH básicos, pudiendo ser el resultado de una combinación de factores de la composición química de las enmiendas orgánicas agregadas que pueden contribuir al aumento del pH.

Para una mejor apreciación de la evolución del pH del sustrato se agruparon las mezclas M2,M3,y M4 (ver figura 8.A) siendo las mezclas con menor contenido de enmiendas orgánicas en su composición, mientras que en las figuras 8B,8C,8D y 8E se aprecia la agrupación de las mezclas realizadas por duplicado, con la variación de cal dentro de la composición.

En la figura 8.A se puede apreciar que existe una ligera variación de pH entre las mezclas M2, M3 y M4, siendo la mezcla M3 la que presenta un pH superior a las demás, lo cual estaría asociado a la combinación del estiércol de vaca y conejo, lo que podría contribuir a un mayor aumento del pH por la interacción de las enmiendas y por la descomposición de la MO.

Ahora bien, en la figura 8B se puede apreciar que las mezclas M5 y M9 presentan un comportamiento muy similar entre sí, la mezcla M9 por su parte presenta pH más elevados en comparación a la mezcla M5, lo cual podría asociarse a la cal que ha sido agregada a la mezcla. En la figura 8D se aprecia un comportamiento muy similar al anterior, puesto que, las mezclas M8 y M12 presentan una tendencia similar entre sí, encontrándose la M12 ligeramente por encima de la M8 asociada una vez más a la adición de cal.

Caso contrario ocurre en las mezclas M6 y M10, mostrado en la figura 8E, donde los primeros meses del experimento la tendencia es similar entre las mezclas, aumentando progresivamente el pH del sustrato, sin embargo, en el mes de agosto el comportamiento es diferente, por un lado, el pH de la mezcla M10 aumenta mientras que el pH de la mezcla M6 disminuye. El aumento presentado podría estar asociado al igual que las otras mezclas a la adición de cal, mientras que el descenso reportado en la mezcla M6 estaría asociado a la descomposición de la MO por parte de los lodos de depuradora, la cual libera ácidos orgánicos que pueden disminuir el pH.

En la figura 8E se aprecia una mayor variabilidad entre las mezclas, en comparación a la tendencia identificada en las demás gráficas, en esta se observa que la mezcla M7 presenta un pH más alto con respecto a la mezcla M11, la cual se esperaría que fuera superior por su contenido de cal, no obstante, eso no ocurre, indicando así que el aumento del pH no está asociado a la adicción de cal, ya que las propias enmiendas orgánica presenta una capacidad natural de neutralización.

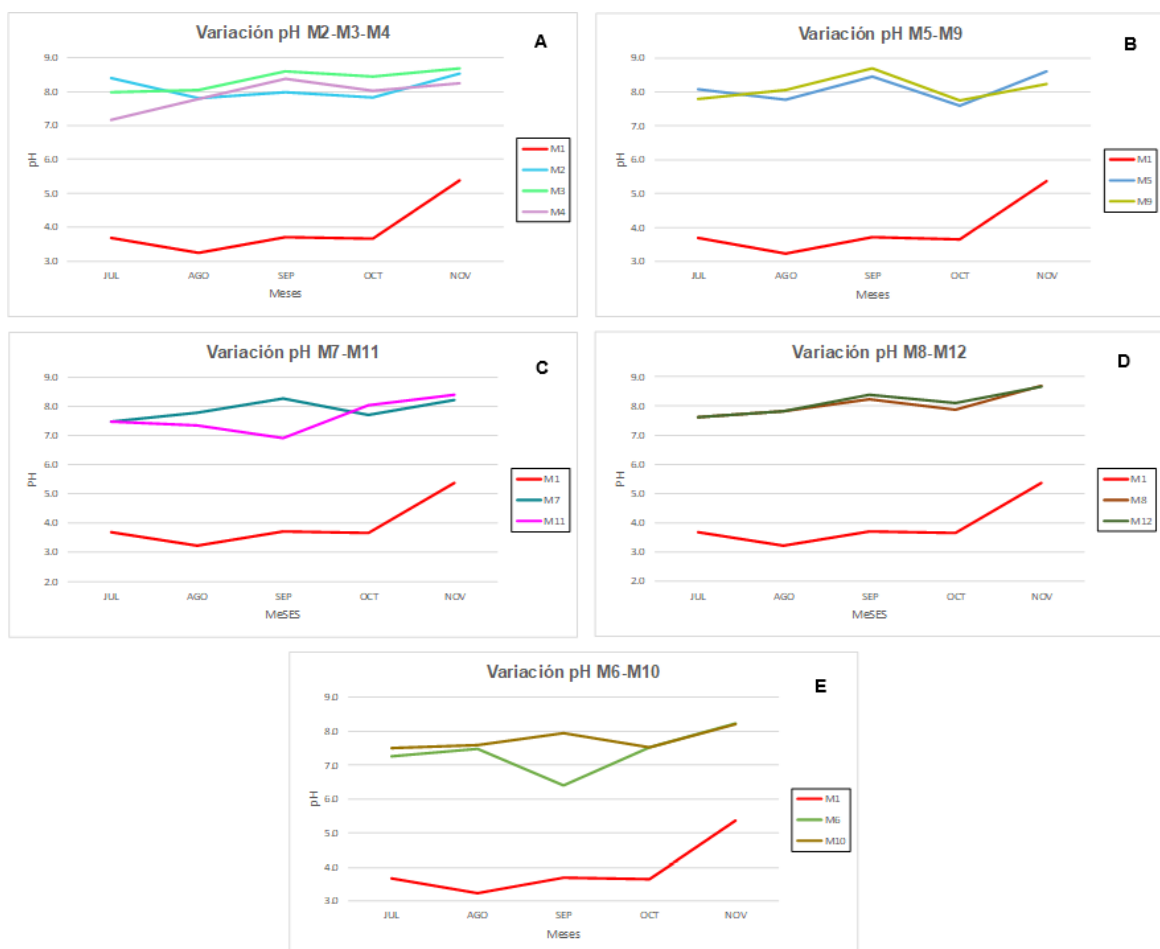


Figura 8 Variación del pH de lixiviados.

## 5.5 Desarrollo vegetal

Pasada una semana desde la siembra del centeno forrajero, se observó el crecimiento de las semillas en todas las mezclas, siendo más evidente en unas mezclas que en otras. En el caso de la M1 el crecimiento fue más lento y en menor densidad en comparación con las demás.

La figura 9A ilustra el crecimiento vegetal de la M2 después de la primera semana de la siembra de centeno. En cuanto a las figuras 9B1 y 9B2, representan el desarrollo vegetal después de un mes desde la siembra para las mezclas M1 y M2, respectivamente. Se aprecia claramente que la incorporación de enmiendas ha desempeñado un papel crucial en la mejora del sustrato, facilitando notablemente el desarrollo de la cobertura vegetal en ambas mezclas.



*Figura 9 Crecimiento vegetal en las muestras M1 Y M2*

Pasados dos meses desde la plantación se observó un gran crecimiento en todas las mezclas con excepción de la muestra control M1, como se muestra a continuación.



*Figura 10 Crecimiento vegetal pasado 2 meses. Izquierda mezcla M1, derecha varias mezclas.*

A partir de pesaje y medición del desarrollo radicular y la vegetación aérea se obtuvieron los siguientes resultados, por medio de los cuales fue posible establecer las mezclas con mejor rendimiento en cuanto al desarrollo vegetal aéreo y radicular.

Tabla 13. Resultados desarrollo Vegetal de las muestras.

	Unidades	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Parte aérea	gr	15	464	262	228	274	396	360	170	220	428	520	152
Raíces	gr	305	702	370	1070	812	318	1016	650	350	942	1018	202

Con respecto al desarrollo vegetal aéreo de la planta se puede observar en la tabla 13 que la muestra M11 fue la que obtuvo un mejor resultado con un peso de 520 g en comparación con la M1 que como era de esperarse es la muestra con menor desarrollo vegetal, reportando un peso de 15g. Ahora bien, considerando el desarrollo radicular la muestra M4 obtuvo mejores resultados con un peso de 1070g, mientras que la muestra con un desarrollo radicular menor es la M12 con un peso de 202 g.

### 5.6 Caracterización físico-química de los suelos.

Los análisis realizados en el laboratorio Aquimisa aportaban información física y química de los suelos, sin embargo, se consideraron los siguientes parámetros como objetos de análisis y comparación de los resultados con respecto a los objetivos planteados:

Tabla 14. Resultados analíticos de suelos.

Parámetros	Unidades	Suelo objetivo	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
pH	Unidad pH	>6	6.76	8.12	8.18	8.20	8.12	8.24	7.30	7.81	8.23	7.89	8.40	8.24
Conductividad Eléctrica	mS/cm	<0.4	0.59	0.65	1.24	1.15	0.89	3.16	0.67	0.92	1.33	0.84	0.60	3.16
Materia orgánica	%	1.5-2.0	0.00	0.80	0.50	0.30	0.06	2.34	0.60	1.20	1.10	0.70	0.60	2.30

Como se observa en la tabla 14 todas las mezclas han alcanzado el objetivo de pH estando superiores a 6, lo que quiere decir que se ha alcanzado un pH básico que no representara ser un problema para el crecimiento vegetal. Con respecto al contenido de MO, las mezclas que han alcanzado el valor objetivo son las siguientes: M6 con porcentaje de 2.34%, lo cual supera el valor objetivo, considerando que para esta mezcla se había planteado alcanzar un 1%, caso contrario ocurre con la mezcla M8 a la cual se le adicionaron enmiendas orgánicas en mayor proporción con el fin de alcanzar un porcentaje del 2%, por su parte la M12 cumplió con el objetivo establecido alcanzando un 2.30% de MO.

Con respecto a la conductividad eléctrica ninguna de las muestras ha alcanzado el valor objetivo, sin embargo, el valor de 0.4 mS/cm es muy conservador, puesto que, en un suelo agrícola se puede considerar valido un valor hasta 1 mS/cm, e incluso es tolerable en un rango de 2-4 mS/cm (Urbano Terrón, 2015). En cualquier caso, siempre el ideal será el valor más bajo de conductividad. Considerando esto, se puede apreciar que todas las mezclas cuentan

con un valor válido de conductividad eléctrica, resaltando las mezclas M1 y M11 con un valor de 0.59 mS/cm y 0.60 mS/cm respectivamente, siendo las mezclas con menor conductividad.

Ahora bien, para un mejor análisis y determinación de la mezcla con mejor evolución se ha considerado analizar además del desarrollo vegetal, materia orgánica total, el pH y la conductividad eléctrica, analizar el porcentaje de saturación, la capacidad de intercambio catiónico, el punto de marchitez y la capacidad de campo, considerando que, brindan mayor información sobre el comportamiento de las mezclas, los resultados son los siguientes:

Tabla 15. Resultados parámetros químicos de las muestras.

Parámetros	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
Parte aérea (g)	<b>15</b>	464	262	228	274	396	360	170	220	428	<b>520</b>	152
Raíces (g)	305	702	370	<b>1070</b>	812	318	1016	650	350	942	1018	<b>202</b>
pH	<b>6.8</b>	8.1	8.2	8.2	8.1	8.2	7.3	7.8	8.2	7.9	<b>8.4</b>	8.2
Conductividad	<b>0.6</b>	0.7	1.2	1.2	0.9	<b>3.2</b>	0.7	0.9	1.3	0.8	0.6	3.2
% Saturación	15.5	<b>13.2</b>	22.1	24.1	15.9	23.5	<b>26</b>	18.3	15.1	23.8	21.5	23.5
CIC	<b>2.4</b>	9.3	11.3	8.7	12.2	4.1	6.6	6.9	10.6	6.7	3.5	<b>12.7</b>
MO_total	<b>0</b>	0.8	0.5	0.3	0.1	<b>2.3</b>	0.6	1.2	1.1	0.7	0.6	2.3
Densidad aparente	<b>1.3</b>	1.4	1.5	1.5	1.5	1.3	1.5	1.4	1.4	1.5	<b>1.6</b>	1.3
CC	6.3	<b>13.2</b>	5.6	7.9	7.9	10.9	7.2	7.9	10.2	7.9	<b>4.9</b>	10.9
PM	2.3	<b>6.7</b>	1.9	3.3	3.3	5.2	2.9	3.3	4.8	3.3	<b>1.5</b>	5.2

En la tabla 15 se resaltan los valores máximos (resaltados en rosa) y los mínimos (resaltados en azul) de cada uno de los parámetros, donde se puede apreciar que la mayoría de los valores mínimos se encuentran en la muestra M1, considerando que al ser la muestra control esta no contaba con aportes de enmiendas que contribuyeran al mejoramiento de las características edáficas del sustrato.

Para identificar la muestra con mejores resultados se realizó un análisis estadístico utilizando un método de jerarquización de las 12 muestras en función a cada uno de los parámetros. Esto se basó en la identificación de las muestras cuyos resultados superaran el 80% del valor de referencia, siendo estas las muestra que obtuvieron mejores resultados, ubicándose en los primeros lugares. Sin embargo, para el caso de la conductividad se seleccionaron las muestras que se ubicaran en los últimos lugares, es decir, aquellas muestras con un contenido menor, dado que, lo ideal serían suelos con baja conductividad a fin de evitar problemas de salinización.

Los resultados obtenidos en la tabla 16, muestran los valores resaltados en color verde representan aquellas mezclas con mejores rendimientos en función a cada uno de los parámetros analizados.

Tabla 16. Evaluación de la evolución de las mezclas con respecto a los parámetros.

Desarrollo vegetal-aéreo				Desarrollo vegetal-raíces				pH.			
Mezclas	Valor	Jerarquía	Porcentaje	Mezclas	Valor	Jerarquía	Porcentaje	Mezclas	Valor	Jerarquía	Porcentaje
11	520.0	1	100.00%	4	1070.0	1	100.00%	11	8.4	1	100.00%
2	464.0	2	90.90%	11	1018.0	2	90.90%	6	8.2	2	81.80%
10	428.0	3	81.80%	7	1016.0	3	81.80%	12	8.2	2	81.80%
6	396.0	4	72.70%	10	942.0	4	72.70%	9	8.2	4	72.70%
7	360.0	5	63.60%	5	812.0	5	63.60%	4	8.2	5	63.60%
5	274.0	6	54.50%	2	702.0	6	54.50%	3	8.2	6	54.50%
3	262.0	7	45.40%	8	650.0	7	45.40%	2	8.1	7	36.30%
4	228.0	8	36.30%	3	370.0	8	36.30%	5	8.1	7	36.30%
9	220.0	9	27.20%	9	350.0	9	27.20%	10	7.9	9	27.20%
8	170.0	10	18.10%	6	318.0	10	18.10%	8	7.8	10	18.10%
12	152.0	11	9.00%	1	305.0	11	9.00%	7	7.3	11	9.00%
1	15.0	12	0.00%	12	202.0	12	0.00%	1	6.8	12	0.00%

Conductividad				% Saturación				Capacidad de intercambio catiónico			
Mezclas	Valor	Jerarquía	Porcentaje	Mezclas	Valor	Jerarquía	Porcentaje	Posición	Valor	Jerarquía	Porcentaje
6	3.2	1	90.90%	7	26.0	1	100.00%	12	12.7	1	100.00%
12	3.2	1	90.90%	4	24.1	2	90.90%	5	12.2	2	90.90%
9	1.3	3	81.80%	10	23.8	3	81.80%	3	11.3	3	81.80%
3	1.2	4	72.70%	6	23.5	4	63.60%	9	10.6	4	72.70%
4	1.2	5	63.60%	12	23.5	4	63.60%	2	9.3	5	63.60%
8	0.9	6	54.50%	3	22.1	6	54.50%	4	8.7	6	54.50%
5	0.9	7	45.40%	11	21.5	7	45.40%	8	6.9	7	45.40%
10	0.8	8	36.30%	8	18.3	8	36.30%	10	6.7	8	36.30%
7	0.7	9	27.20%	5	15.9	9	27.20%	7	6.6	9	27.20%
2	0.7	10	18.10%	1	15.5	10	18.10%	6	4.1	10	18.10%
11	0.6	11	9.00%	9	15.1	11	9.00%	11	3.5	11	9.00%
1	0.6	12	0.00%	2	13.2	12	0.00%	1	2.4	12	0.00%

Materia orgánica total				Densidad aparente				Agua Útil (CC-PM)			
Posición	Valor	Jerarquía	Porcentaje	Posición	Valor	Jerarquía	Porcentaje	Posición	Valor	Jerarquía	Porcentaje
6	2.3	1	100.00%	11	1.6	1	100.00%	2	6.5	1	1
12	2.3	2	90.90%	4	1.5	2	90.90%	6	5.7	2	0.818
8	1.2	3	81.80%	10	1.5	3	81.80%	12	5.7	3	0.818
9	1.1	4	72.70%	3	1.5	4	54.50%	9	5.4	4	0.727
2	0.8	5	63.60%	5	1.5	4	54.50%	4	4.6	5	0.363
10	0.7	6	54.50%	7	1.5	4	54.50%	5	4.6	6	0.363
7	0.6	7	36.30%	2	1.4	7	36.30%	8	4.6	7	0.363
11	0.6	7	36.30%	9	1.4	7	36.30%	10	4.6	8	0.363
3	0.5	9	27.20%	8	1.4	9	27.20%	7	4.3	9	0.272
4	0.3	10	18.10%	1	1.3	10	0.00%	1	4	10	0.181
5	0.1	11	9.00%	6	1.3	10	0.00%	3	3.7	11	0.09
1	0.0	12	0.00%	12	1.3	10	0.00%	11	3.4	12	0

Basándonos en la información proporcionada en la tabla 16, se destaca que la mezcla M11 exhibe una evolución más favorable de los parámetros analizados, lo que contribuye significativamente a mejorar las características edáficas del sustrato. Este rendimiento superior se refleja en un desarrollo más pronunciado tanto a nivel aéreo como radicular de las plantas, indicando que la incorporación de enmiendas orgánicas ha creado condiciones óptimas para su crecimiento. Este mejoramiento abarca aspectos clave como la textura del suelo, la capacidad de retención de agua y la disponibilidad de nutrientes. Estos beneficios se atribuyen a la inclusión de diversas enmiendas orgánicas en la mezcla, siendo destacable que la M11 engloba todas ellas, como estiércol de vaca, estiércol de conejo, lodos de depuradora, paja, carbón vegetal y cal.

Adicionalmente, la presencia de un pH básico en esta mezcla favorece el desarrollo vegetal y la actividad microbiológica del suelo. La densidad aparente del suelo, al ser mayor, contribuye a mejorar su estructura, permitiendo que el agua y los nutrientes se retengan por más tiempo, proporcionando así recursos disponibles para las plantas. Este fenómeno contribuye al

desarrollo vegetal y confiere al sustrato una mayor estabilidad frente a la erosión, siendo estas características también resultado de las distintas enmiendas añadidas a la mezcla.

Otro aspecto relevante es la baja conductividad eléctrica presentada por la mezcla M11. Este detalle es crucial, ya que niveles elevados de conductividad podrían impactar negativamente en la disponibilidad de nutrientes esenciales para las plantas, limitando su desarrollo. En conjunto, estos hallazgos subrayan la importancia de la mezcla M11 como una opción eficaz para mejorar las condiciones del sustrato, promoviendo un ambiente propicio para el crecimiento vegetal y la sostenibilidad del ecosistema.

## **5.6. Resultados estadísticos**

Con el objetivo de identificar la relación entre el componente agregado en las mezclas y los resultados obtenidos, se realizó un análisis estadístico a partir de regresión múltiple, considerando como variable independiente los componentes agregados en las mezclas y como variable dependiente los parámetros de interés. El coeficiente de correlación  $R^2$  indica la variabilidad de la variable dependiente, con un rango entre 0 y 1, donde, 0 indica que no es posible establecer una relación entre las variables y el 1 indica la relación entre ellas, es decir, la variabilidad (Montero Granados, 2016).

En la tabla 18 se muestran los resultados obtenidos. Se puede apreciar que muchos de los componentes presentan un  $R^2$  bajo, lo que indica que no se explica ninguna variabilidad entre las variables, sin embargo, hay algunos que, si bien no son muy altos, los valores de  $R^2$  podrían mostrar variabilidad, como por ejemplo el porcentaje de saturación y los lodos de depuradora que presentan un  $R^2$  de 0.48, la CIC y el estiércol de conejo con un  $R^2$  de 0.41 y la MO y el carbón vegetal con  $R^2$  0.38.

Tabla 17. Resultados análisis de regresión múltiple.

	Estiércol de vaca+paja	Estiércol de conejo	Paja	Carbon vegetal	Lodos depuradora	Cal	r <sup>2</sup> modelo
Parte aérea							
Raíces							
CC_mina		R2=0.62 p=0.0023				R2=0.109 p=0.0879	R2=0.732 p=0.0027
pH	R2=0.12 p=0.261				R2=0.128 p=0.235	R2=0.131 p=0.248	R2=0.379 p=0.259
Conductividad					R2=0.207 p=0.137		R2=0.307 p=0.137
% Saturación		3 R2=0.205 p=0.0275	2 R2=0.085 p=0.214		1 R2=0.483 p=0.012		R2=0.773 p=0.0058
CIC	2 R2=0.124 p=0.152	1 R2=0.419 p=0.023					R2=0.543 p=0.029
MO total				R2=0.378 p=0.033			R2=0.378 p=0.033
Densidad aparente			3 R2=0.0969 p=0.3178	1 R2=0.113 p=0.285		2 R2=0.106 p=0.296	R2=0.316 p=0.359
CC	1 R2=0.227 p=0.117	2 R2=0.1556 p=0.166	3 R2=0.137 p=0.136				R2=0.540 p=0.087
PM	1 R2=0.236 p=0.109	2 R2=0.1567 p=0.0.161	3 R2=0.1527 p=0.1396				R2=0.5457 p=0.083

El R2 del modelo se calcula como la suma de las varianzas individuales evaluadas en el modelo. En la tabla 17 de puede observar que el valor más alto de R2 se atribuye al parámetro de porcentaje de saturación, del cual se interpretar que el 77% de la variabilidad en el porcentaje de saturación puede ser explicada por la adición de estiércol de conejo, paja y lodos de depuradora. No obstante, entre estas tres enmiendas, el estiércol de conejo muestra el R2 más elevado, alcanzando un valor de 0.48. Esto indica que el 48% de las variaciones observadas en el porcentaje de saturación pueden ser atribuidas a la proporción de lodos de depuradora agregados al sustrato.

Otro parámetro representativo es la CIC, con un R2 de 0.54. En este caso, destaca el R2 del estiércol de conejo (R2 0.40) en comparación con el estiércol de vaca. Esto sugiere que aproximadamente el 40% de la variabilidad en la CIC del suelo puede ser explicada por la adición del estiércol de conejo mientras que, el 60% restante de la variabilidad de la CIC podría asociarse a otros factores influyentes en este parámetro del suelo.

En cuanto a la materia orgánica, se encuentra que aproximadamente el 37% de la variabilidad en el contenido de materia orgánica está relacionado con la adición de carbón vegetal en el sustrato.

En resumen, al considerar las múltiples interacciones que tienen lugar en el suelo, resulta complejo establecer una relación clara entre las variables. Sin embargo, la información anterior brinda una idea de la influencia que tiene la adición de enmiendas en los parámetros analizados.

## 6. DISCUSIÓN

La presencia de un suelo saludable garantiza el desarrollo vegetal, el cual contribuye al control de erosión, la estabilización del terreno y a la retención del agua, dando paso a que las zonas restauradas adquiera condiciones óptimas para el desarrollo de la vegetación y que se integren con su entorno natural. Para ello, el suelo debe contar con las características propias de la zona, de tal forma que, en las zonas restauradas exista la presencia de suelos con características similares y por ende vegetación propia, este fue el objetivo principal de la investigación, lograr un suelo objetivo basado en las características de la zona. Si bien no se alcanzaron dichos objetivos con las muestras realizadas, estas proporcionaron gran información para realizar ajuste en la mezcla definitiva.

Se obtuvo que la mezcla que tuvo mejor evolución fue la mezcla M11, la cual contenía estiércol de vaca+paja y estiércol de conejo en iguales proporciones, una mayor proporción de lodos de depuradora, paja y carbón vegetal en igual proporción y cal. A partir del análisis de cada uno de estos componentes fue posible observar que, los mejores rendimientos en cuanto a la capacidad de intercambio catiónico podrían estar asociado a la adición de estiércoles, en especial el estiércol de conejo, ya que cuentan con características físicas y químicas que contribuye a la retención de nutrientes estando disponibles para las plantas aumentando así la fertilidad del suelo, proporcionando suelos con una mejor estructura, reduciendo la erosión y la generación de lixiviados que generen la pérdida de nutrientes y materia orgánica del suelo.

Esto último, se pudo observar durante el desarrollo de la investigación, dado que, durante las primeras semanas se presentaban lixiviados con colores oscuros a los que se les asociaba con el contenido de estiércol, esto quiere decir que, muy probablemente la materia orgánica que es aportada por el estiércol y los demás componentes orgánicos estaba siendo lavada, más aún por la textura arenosa del suelo, que podía facilitar el arrastre de los nutrientes y la MO. Lo anterior, se observa en los contenidos de MO obtenidos en los análisis realizados, donde aquellas mezclas conformadas por estiércoles y lodos de depuradora que aportaría un porcentaje de materia orgánica se encontraron en un rango similar a la muestra control estando incluso por debajo del objetivo estimado (1.5%) esto se explicaría por que al ser regados constantemente fueron lavados, arrastrando la materia orgánica aportada por los estiércoles, disminuyendo así el contenido de materia orgánica en los suelos, quedando reportado únicamente la materia orgánica que pudo ser fijada o bien, aquella que fuese más resistente al arrastre del lavado.

Considerando lo anterior, se puede observar que se requiere de una fuente de materia orgánica que se fije en el suelo y que no sea fácilmente lavable, de tal forma que esté disponible en el tiempo. Estas características son aportadas por la paja y el carbón vegetal, debido a que son componentes más resistentes a la descomposición y al lavado, lo que quiere decir que podrán permanecer más tiempo en el suelo, contribuyendo así a la disposición de nutrientes y favorecer el crecimiento microbiano, siendo un factor importante para el desarrollo adecuado del suelo. De igual forma, los lodos de depuradora también aportan materia orgánica que puede ser retenida en el suelo, no en la misma proporción que el carbón vegetal, pero en caso de no tener acceso a este componente los lodos y la paja pueden ser opciones viables para adquirir estas características.

Sin embargo, a la hora de agregar lodos de depuradora a los tecnosoles se debe prestar especial atención a la conductividad eléctrica, dado que, debido al tratamiento que reciben pueden contener sales minerales que son liberadas y aumentan la conductividad eléctrica del suelo afectando la calidad del mismo. Esto quiere decir que, se debe tener una adecuada gestión de la aplicación de los lodos, adoptando prácticas para su aplicación, así como también conociendo la interacción y los aportes de los demás componentes que se agregan en la mezcla.

Con respecto al pH, se observó desde el inicio de la investigación que con la adición de los componentes orgánicos disminuye la acidez del suelo, llegando a presentarse suelos con pH básicos, esto puede ser el resultado de una combinación de factores que pueden contribuir al aumento del pH sin que aparentemente la adición o no de cal afectara.

Considerando que el estiércol de vaca y conejo contribuye en la mejora de la CIC el suelo, este adquiere la capacidad de retener iones, lo que afecta la disponibilidad de iones hidrógeno y por lo tanto aumenta el pH del suelo. Otro factor que podría mejorar el pH del suelo es la descomposición de la materia orgánica que liberan entre otras cosas, iones básicos que elevan el pH de los lixiviados. Lo anterior indica que la adición de cal para la corrección del pH no es necesaria.

Con respecto a lo anterior, es importante considerar las proporciones óptimas de cada una de las enmiendas con el fin de ajustar el rendimiento de la mezcla definitiva, así como también, comprender las diversas relaciones existentes entre los componentes con respecto a los parámetros del suelo, considerando siempre los retos que trae consigo el desarrollar tecnosoles.

Los resultados obtenidos en la investigación proporcionan información de gran interés para ajustar la mezcla final que será implementada en la restauración, dado que orientan hacia el uso de enmiendas claves para el desarrollo del tecnosol, resaltando el uso de estiércol tanto

de vaca como de conejo, siempre y cuando se tenga una adecuada gestión de aplicación de todos los componentes, con el fin de promover la resiliencia del suelo frente a cambios, pero aún más que se alcance un tecnosol que perdure en el tiempo y se integre con su entorno natural.

## 7. CONCLUSIONES

- Como conclusión principal, tras evaluar parámetros como el pH, CIC, materia orgánica, porcentaje de saturación, disponibilidad del agua y desarrollo vegetal, se determina que la mezcla M11 reúne las características más apropiadas para el desarrollo del suelo, considerando que, al presentar condiciones adecuadas con respecto a los parámetros analizados garantiza un suelo saludable y favorable para el crecimiento vegetal. Con base en ello se fija la importancia que tiene el análisis de cada uno de los componentes para los tecnosoles, ya que en función de ello se maximiza el rendimiento y productividad del suelo.
- Con respecto a los componentes, el uso de estiércol bien sea de conejo o de vaca reflejan ser los componentes más estratégicos para la creación de tecnosol, considerando que no solo contribuye en la capacidad de intercambio catiónico, sino que además influyen en la mejora de la estructura del suelo, generando así condiciones favorables para el desarrollo vegetal.
- Si bien el uso de los lodos de depuradora puede ser beneficiosos debido a su aporte de nutrientes para el desarrollo del suelo se debe tener precaución al agregarlo para evitar efectos adversos en la calidad del suelo, debido a su potencial de aumento de conductividad.
- Los tecnosoles han surgido como una prometedora alternativa para la recuperación de suelos afectados por condiciones edáficas adversas y degradación antrópica. Los estudios realizados en este proyecto indican resultados alentadores, evidenciando mejoras significativas en la calidad del suelo mediante la implementación de tecnosoles. Sin embargo, es necesario llevar a cabo más investigaciones específicas que aborden aspectos cruciales para determinar la viabilidad a largo plazo de los tecnosoles en diversas condiciones y contextos. Estos estudios adicionales permitirán obtener una comprensión más completa de los beneficios, desafíos y limitaciones asociados con los tecnosoles, contribuyendo así a su aplicación efectiva y sostenible en la restauración de suelos.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Ayuntamiento de Vitoria - Gasteiz, & Centro de Estudios Ambientales. (2018). Tecnosuelos de Gardelegi. <https://tecnosuelosgardelegi.blogspot.com>
- Bolaños Guerrón, D. (2014) Aplicación de Tecnosoles para la recuperación de suelos y aguas afectados por actividades de obras civiles, urbanas y minería. Universidad Santiago Compostela.
- García - Izquierdo, C., & Cerdá Cerdá, A. (2008). Enmiendas orgánicas para suelos basadas en residuos orgánicos. Academia de Ciencias de la Región de Murcia.
- Iglesias Martínez, L. (1995). El estiércol y las prácticas agrarias respetuosas con el medio ambiente. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación.
- López Rodríguez G, Ruíz Fernández J, & Masaguer A. (2014). Utilización de sustratos orgánicos sostenible ensayados en una cubierta vegetal: preliminar. De Residuo a Recurso: Estrategias de Gestión Tratamiento y Valorización.
- Macías V Felipe. (2004). Tecnosoles origen y aplicaciones. Laboratorio de Tecnología Ambiental. Instituto de Investigaciones Tecnológicas, 1.
- Macías V Felipe. (2009). Tecnosoles Suelos a la Carta. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Santiago de Compostela.
- Milán Gay L. (2015). Influencia de la materia orgánica del suelo en el secuestro de carbono. Biochar, una estrategia potencial.
- Montero Granados, R. (2016). Modelos de regresión lineal múltiple. Departamento de Economía Aplicada. Universidad de Granada.
- Murillo Montoya S, Mendoza Mora A, & Fadul Vásquez C. (2019). La importancia de las enmiendas orgánica en la conservación del suelo y la producción agrícola. Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales.
- Mapa Geológico de España (1996): Escala 1:50.000, nº 449 (Salamanca). ITGE. Madrid.
- Mapa Hidrogeológico de Castilla y León: Memoria y Mapa Hidrogeológico (1995). Escala 1:500000. Junta de Castilla y León.
- Paradelo R. (2013). Utilización de materiales compostados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de minas. Boletín Geológico y Minero .
- Restauración de la función de los ecosistemas en suelos urbanos degradados utilizando biosólidos, mezcla de biosólidos y compost. (2015). Revista de Calidad Ambiental.
- Román Pilar, Martínez M María, & Pantoja Alberto. (2013). Manual de compostaje del agricultor. Experiencia en América latina.
- Rodríguez Alonso, M. D. (1985). El complejo esquisto- grauváquico y el paleozoico en el centro- oeste español. Acta Salmanticensia 51 (Universidad de Salamanca, Salamanca).
- Saloro SLU. (2019). Estudio de impacto ambiental.
- Silva Lucas CR, Correa Studart Rodrigo, Wright Jaime L, Bomfim Bárbara, Hendricks Lauren, Gavin Daniel, Wstphal Muñiz Aleksander, Coimbra Martins Gilvan, Vargas Motta Antonio Carlos, Zimmer Barbosa Julierme, Vander de Freitas Melo, Joven Scott D, R. Broadley Martin, & Ventura Santos Roberto. (2021). Una nueva hipótesis sobre el origen de las tierras oscuras amazónicas. Nature Communications.

Soriano Disla José Martín, & Navarro Pedreño. (2009). Contribución de una aplicación de lodos de depuradora al secuestro de carbono a corto plazo en una amplia gama de suelos agrícolas. Ciencias de Medio Ambiente.

Trueba, C., Millán, R., Schmid, T., Lago, C., Roquero, C., Magister, M. (1999). Base de Datos de Propiedades Edafológicas de los Suelos Españoles. Volumen X. Castilla y León (a). Informes Técnicos Ciemat, 176 pp

Urbano Terrón, P. (2015). Tratado de Fitotecnia general (2 edición, Vol. 2).

Vadillo Fernández L, & Ayala Carcedo F.J. (2005). Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Instituto tecnológico GeoMinero de España.