

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA QUÍMICA**



**PROYECTO DE GRADO**

**“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**POSTULANTE: Univ. MARTÍNEZ PAREDES GIANCARLA**

**XIMENA**

**TUTOR: PhD. LUIS G. LÓPEZ NINA**

LA PAZ – BOLIVIA

DICIEMBRE, 2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS  
FACULTAD DE INGENIERIA**



**LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.**

**LICENCIA DE USO**

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

**TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.**

## **DEDICATORIA**

A mis padres y hermano, quienes me inspiraron a seguir adelante con esta meta, a mi familia, por motivarme y creer en mis capacidades, a mis amigos y novio, quienes me brindaron su apoyo y a los docentes por brindarme conocimiento y orientación.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por haberme dado las fuerzas para poder culminar mi carrera y haberme brindado una vida llena de aprendizajes, experiencias y felicidades.

A mis papás Juan Carlos Martínez y Elizabeth Paredes por su amor, trabajo, sacrificio y apoyo incondicional en todos estos años, además de ser mi soporte emocional y económico para poder concentrarme en mis estudios. A mi hermano Brandon, por ser mi principal inspiración para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. A mi novio Yamil por estar a mi lado, dándome apoyo.

A mi tutor PhD. Luis López Nina y a mis tribunales Ing. Boris Párraga e Ing. Santiago Morales por su dedicación, paciencia, guía y apoyo a lo largo del desarrollo de mi proyecto de grado.

Al instituto de Investigaciones Químicas (IIQ), el Instituto del Gas Natural (IGN) por permitirme realizar mi proyecto de grado en sus ambientes.

A las empresas JATA S.R.L y Yacimientos de Litio Boliviano (YLB) por brindarme las materias primas necesarias para la elaboración del proyecto.

A la cooperación sueca ASDI, COSUDE, TWAS – UNESO, por el financiamiento de los proyectos de investigación: “Production of renewable materials and applications – Subprogram/ASDI”, Gestión de Residuos de Bioseguridad y Aprovechamiento para la Generación de Productos de Valor Agregado a través de Procesos Químicos” y Project 20-218 RG/CHE/LA\_I/, respectivamente.

A mis amigos, por estar a mi lado todo este tiempo y por hacer que mi experiencia universitaria sea una de las más gratas en mi vida.

## **“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**

### **RESUMEN**

El uso de fertilizantes ha permitido mejorar la producción y el rendimiento de los cultivos a lo largo de los años, sin embargo, su uso excesivo puede provocar pérdidas significativas de nutrientes (Nitrógeno, Fosforo, Potasio) a consecuencia de la lixiviación, lo que deriva en problemas ambientales como la eutrofización y degradación de suelos, además de pérdidas económicas para los agricultores. Como alternativa para hacer frente a este problema se ha planteado la fabricación de fertilizantes de liberación lenta (SRF), los cuales se encargan de liberar gradualmente los nutrientes al suelo, siendo elaborados generalmente con recubrimientos poliméricos o con materiales de soporte. El biochar es un material carbonoso que ha sido empleado para mejorar la calidad del suelo y que tiene el potencial para ser empleado como material de soporte en la elaboración de los SRF, debido a su capacidad de adsorción de nutrientes.

El objetivo del presente proyecto fue la obtención de un fertilizante de liberación lenta a partir de biochar (proveniente de residuos de poda) mezclado con fertilizante balanceado NPK (derivado de la mezcla de urea, roca fosfórica y cloruro de potasio). Se elaboraron pastillas de fertilizante, variando la relación másica NPK/biochar para posteriormente ser sometidas a una prueba de lixiviación en columna de arena, de modo que se obtenga la relación óptima que permita disminuir la liberación de los nutrientes presentes en el fertilizante ( $\text{N-NO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  y  $\text{K}^+$ ). Adicionalmente, se realizó el Análisis de Varianza de una sola vía, junto con los métodos de Dunnett y Tukey, para identificar si existen diferencias significativas entre las formulaciones. Complementariamente, se realizó la caracterización de las pastillas de fertilizante determinando su área superficial, pH, conductividad eléctrica, absorción de agua y retención de agua en suelo.

Los resultados del análisis de varianza indican que sí existen diferencias significativas entre tratamientos, principalmente entre la muestra de control (NPK) y la formulación NPK/biochar 1:2. La adición de biochar en una proporción másica NPK/biochar 1:2 ayuda a disminuir la lixiviación del  $\text{N-NH}_4$  y  $\text{K}^+$  a 68,57 % y 81,85 % respectivamente, siendo porcentajes menores a los obtenidos tras utilizar únicamente el fertilizante NPK. La lixiviación de nutrientes puede ajustarse al modelo modificado de Michaelis Menten, donde también se observó que, a mayor contenido de biochar existe menor concentración acumulada máxima ( $A_{\text{max}}$ ) y es mayor el tiempo de lixiviación de la mitad de la concentración acumulada máxima ( $t_{1/2 \text{ max}}$ ), por lo que la liberación de nutrientes es más lenta, determinándose como formulación óptima la relación másica NPK/biochar 1:2. En el caso del  $\text{NO}_3\text{-N}$ , la adición de biochar no presentó un efecto significativo en la lixiviación de nutrientes.

El fertilizante NPK/biochar 1:2 presenta una baja lixiviación de nutrientes, pH básico, baja conductividad y alta capacidad de retención de agua, por lo que puede ser aplicado en algunas regiones del Altiplano Boliviano para mejorar la productividad y la calidad del suelo.

## **“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**

### **ABSTRACT**

The use of fertilizers has allowed to improve the production and yield of crops over the years; however, their excessive use can cause significant losses of nutrients (Nitrogen, Phosphorus, Potassium) as a result of leaching, which results in environmental problems such as eutrophication and soil degradation, in addition to economic losses for farmers. As an alternative to address this problem, the manufacture of slow release fertilizers (SRF) has been proposed, which are responsible for gradually releasing nutrients into the soil, generally being made with polymeric coatings or support materials. Biochar is a carbonaceous material that has been used to improve soil quality and has the potential to be used as a support material in the SRF production, due to its nutrient adsorption capacity.

The objective of this project was to obtain a SRF from biochar (from pruning waste) mixed with NPK balanced fertilizer (derived from a mixture of urea, phosphate rock and potassium chloride). Fertilizer tablets were prepared, varying the NPK/biochar mass ratio to subsequently be subjected to a leaching test in a sand column, so that the optimal ratio is obtained that allows reducing the release of the nutrients present in the fertilizer (N- NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub> -N, PO<sub>4</sub>-P and K<sup>+</sup>). Additionally, one-way Analysis of Variance was performed, along with the Dunnett and Tukey methods, to identify if there are significant differences between the formulations. Additionally, the characterization of the fertilizer tablets was carried out by determining their surface area, pH, electrical conductivity, water absorption and water retention in the soil.

The results of the analysis of variance indicate that there are significant differences between treatments, mainly between the control sample (NPK) and the NPK/biochar 1:2 formulation. The addition of biochar in a 1:2 NPK/biochar mass ratio helps reduce the leaching of N-NH<sub>4</sub> and K<sup>+</sup> to 68,57% and 81,85% respectively, being lower percentages than those obtained after using only the NPK fertilizer. Nutrient leaching can be adjusted to the modified Michaelis Menten model, where it was also observed that the higher the biochar content, the lower the maximum accumulated concentration ( $A_{max}$ ) and the longer the leaching time of half the maximum accumulated concentration ( $t_{1/2 max}$ ), so the release of nutrients is slower, the NPK/biochar mass ratio 1:2 being determined as the optimal formulation. In the case of NO<sub>3</sub> – N, the addition of biochar did not have a significant effect on nutrient leaching.

The NPK/biochar 1:2 fertilizer has low nutrient leaching, basic pH, low conductivity and high water retention capacity, so it can be applied in some regions of the Bolivian Altiplano to improve productivity and soil quality.

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Antecedentes y planteamiento del problema .....	1
1.1.1 Antecedentes.....	1
1.1.2 Diagnóstico.....	3
1.1.3 Planteamiento del problema .....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general .....	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.2 Alcance, justificación e impactos del proyecto.....	6
1.3.1 Alcance .....	6
1.3.2 Justificación.....	7
1.3.3 Impactos .....	8
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	9
2.1 Generalidades.....	9
2.2 Nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal .....	10
2.3 Propiedades físicas y químicas de los suelos.....	10
2.3.1 Textura .....	10
2.3.2 Porosidad .....	12
2.3.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) .....	12
2.3.4 pH .....	12
2.3.5 Conductividad eléctrica (CE).....	13
2.4 Fertilizantes.....	14
2.4.1 Tipos de fertilizantes.....	15
2.4.2 Tecnologías de producción de fertilizantes .....	16
2.4.3 Entradas y salidas de los nutrientes .....	20
2.4.4 Efectos de los fertilizantes en el medio ambiente.....	21
2.4.5 Mercado de fertilizantes en el mundo.....	22
2.4.6 Mercado de fertilizantes en Bolivia.....	23
2.5 Biochar.....	24
2.5.1 Procesos de producción .....	24
2.5.2 Impactos del biochar en el suelo.....	26
2.6 Fertilizantes de liberación lenta .....	27

2.6.1	Fertilizantes recubiertos.....	27
2.6.2	Fertilizantes dispersos en matriz.....	28
2.6.3	Lixiviación de nutrientes en columna de suelo .....	29
3.	<b>METODOLOGÍA</b> .....	31
3.1	Preparación del fertilizante NPK/Biochar .....	31
3.1.1	Preparación del fertilizante NPK.....	31
3.1.2	Preparación del biochar .....	32
3.1.3	Preparación de las pastillas de biochar – NPK.....	32
3.2	Caracterización .....	34
3.2.1	Área superficial.....	34
3.2.2	Determinación de pH.....	36
3.2.3	Determinación de la conductividad eléctrica.....	36
3.2.4	Absorción de agua .....	37
3.2.5	Retención de agua.....	37
3.3	Columnas de lixiviación .....	38
3.3.1	Ajuste a modelo de lixiviación .....	40
3.3.2	Análisis estadístico .....	40
3.4	Determinación de nitratos .....	40
3.5	Determinación de amonio .....	42
3.6	Determinación de fosfato.....	43
3.7	Determinación de potasio .....	43
4.	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	44
4.1	Caracterización del material .....	44
4.1.1	Área superficial.....	44
4.1.2	Determinación de pH.....	47
4.1.3	Determinación de la conductividad eléctrica (CE).....	47
4.1.4	Determinación de la absorción de agua (WA).....	48
4.1.5	Retención de agua.....	48
4.2	Determinación de iones .....	49
4.2.1	Elaboración de la curva de calibración NH <sub>4</sub> -N .....	49
4.2.2	Elaboración de la curva de calibración NO <sub>3</sub> -N .....	50
4.2.3	Elaboración de la curva de calibración PO <sub>4</sub> -P.....	51

4.2.4	Elaboración de la curva de calibración $K^+$ .....	51
4.3	Columnas de lixiviación .....	52
4.3.1	Amoníaco .....	52
4.3.2	Nitrato.....	57
4.3.3	Fosfato .....	62
4.3.4	Potasio .....	66
4.4	Proceso de producción del fertilizante NPK/Biochar óptimo.....	71
4.4.1	Etapa de pirólisis .....	71
4.4.2	Etapa de empastillado.....	71
4.4.3	Diagrama de proceso .....	73
5.	<b>CONCLUSIONES</b> .....	74
5.1	Conclusiones respecto al primer objetivo .....	74
5.2	Conclusiones respecto al segundo objetivo .....	74
5.3	Conclusiones respecto al tercer objetivo.....	75
5.4	Conclusiones respecto al cuarto objetivo.....	76
5.5	Conclusiones respecto al objetivo general.....	76
6.	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	77
7.	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	78
8.	<b>ANEXOS</b> .....	84

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Importancia de los nutrientes en las plantas .....	11
<b>Tabla 2.2</b> Tipos de salinidad y CE (1 dS/m = 1 mmhos/cm) .....	14
<b>Tabla 2.3</b> Fertilizantes simples importantes.....	16
<b>Tabla 2.4</b> Fertilizantes compuestos - rango de contenidos de nutrientes.....	16
<b>Tabla 2.5</b> Composición química porcentual de tres muestras de roca fosfórica Capinota .....	19
<b>Tabla 2.6</b> Técnicas de conversión termoquímica y sus condiciones de proceso .....	26
<b>Tabla 3.1</b> Formulaciones de las muestras de fertilizante NPK/Biochar .....	33
<b>Tabla 3.2</b> Diseño experimental – Pruebas de lixiviación de nutrientes .....	41
<b>Tabla 4.1</b> Determinación del área superficial .....	46
<b>Tabla 4.2</b> Propiedades físico-químicas de las mezclas de fertilizante NPK/Biochar .....	48
<b>Tabla 4.3</b> Ajuste al modelo modificado de Michaelis Menten de la concentración acumulada de NH <sub>4</sub> – N lixiviado de diferentes muestras de NPK/biochar.....	54
<b>Tabla 4.4</b> Análisis de Shapiro – Wilks de los datos de NH <sub>4</sub> – N lixiviado .....	55
<b>Tabla 4.5</b> Tabla ANOVA de los datos de NH <sub>4</sub> – N lixiviado .....	55
<b>Tabla 4.6</b> Comparación de parejas en método Tukey para NH <sub>4</sub> – N .....	56
<b>Tabla 4.7</b> Ajuste al modelo modificado de Michaelis Menten de la concentración acumulada de NO <sub>3</sub> – N lixiviado de diferentes muestras de NPK/biochar.....	59
<b>Tabla 4.8</b> Análisis de Shapiro – Wilks de los datos de NO <sub>3</sub> – N lixiviado .....	60
<b>Tabla 4.9</b> Tabla ANOVA de los datos de NO <sub>3</sub> – N lixiviado .....	60
<b>Tabla 4.10</b> Comparación de muestras en el método Tukey para NO <sub>3</sub> - N .....	60
<b>Tabla 4.11</b> Ajuste al modelo modificado de Michaelis Menten de la concentración acumulada de PO <sub>4</sub> – P lixiviado de diferentes muestras de NPK/biochar .....	63
<b>Tabla 4.12</b> Análisis de Shapiro – Wilks de los datos de PO <sub>4</sub> – P lixiviado.....	64
<b>Tabla 4.13</b> Tabla ANOVA de los datos de NO <sub>3</sub> – N lixiviado .....	64
<b>Tabla 4.14</b> Comparación de muestras en el método Tukey para PO <sub>4</sub> - P .....	65
<b>Tabla 4.15</b> Ajuste al modelo modificado de Michaelis Menten de la concentración acumulada de K <sup>+</sup> lixiviado de diferentes muestras de NPK/biochar .....	68
<b>Tabla 4.16</b> Análisis de Shapiro – Wilks de los datos de K <sup>+</sup> lixiviado.....	68
<b>Tabla 4.17</b> Tabla ANOVA de los datos de K <sup>+</sup> lixiviado.....	69
<b>Tabla 4.18</b> Comparación de parejas en método Tukey para K <sup>+</sup> .....	69

<b>Tabla 4.19</b> Balance de masa – etapa de pirólisis.....	71
<b>Tabla 4.20</b> Balance de masa – etapa de empastillado .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> Interpretación del pH del suelo .....	13
<b>Figura 2.2</b> Proceso de urea .....	17
<b>Figura 2.3</b> Diagrama de la Operación de Flotación de Silvita (KCl) .....	18
<b>Figura 2.4</b> Representación esquemática de una visión general de los efectos de los derrames agroquímicos en el medio ambiente .....	22
<b>Figura 2.5</b> Tipo de fertilizantes más utilizados en Bolivia en 2018 (en toneladas).....	23
<b>Figura 2.6</b> Etapas de la descomposición de la biomasa a través del proceso pirolítico .....	24
<b>Figura 2.7</b> Mecanismo de los SRF y CRF.....	29
<b>Figura 2.8</b> Factores internos y externos que influyen el proceso de lixiviación.....	30
<b>Figura 3.1</b> Horno reactor de pirólisis.....	32
<b>Figura 3.2</b> Prensa manual para la elaboración de pastillas.....	34
<b>Figura 3.3</b> Caracterización de las muestras .....	36
<b>Figura 3.4</b> Sistema de columnas de lixiviación.....	38
<b>Figura 3.5</b> Esquema de columnas para las diferentes formulaciones .....	39
<b>Figura 4.1</b> Recta B.E.T – NPK.....	44
<b>Figura 4.2</b> Recta B.E.T – Biochar .....	44
<b>Figura 4.3</b> Recta B.E.T – NPK/Biochar 2:1 .....	45
<b>Figura 4.4</b> Recta B.E.T – NPK/Biochar 1:1 .....	45
<b>Figura 4.5</b> Recta B.E.T – NPK/Biochar 1:2 .....	46
<b>Figura 4.6</b> Retención de agua .....	49
<b>Figura 4.7</b> Diferencia de potencial vs Concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$ .....	50
<b>Figura 4.8</b> Absorbancia vs Concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ .....	50
<b>Figura 4.9</b> Absorbancia vs Concentración de $\text{PO}_4\text{-P}$ .....	51
<b>Figura 4.10</b> Absorbancia vs Concentración de $\text{K}^+$ .....	52
<b>Figura 4.11</b> Comportamiento de lixiviación de $\text{NH}_4\text{-N}$ de las distintas mezclas de NPK/biochar.....	53
<b>Figura 4.12</b> Concentración acumulada de $\text{NH}_4\text{-N}$ lixiviada de las distintas mezclas de NPK/biochar.....	54
<b>Figura 4.13</b> Comparación de muestras en el método Dunnett para $\text{NH}_4\text{-N}$ .....	56
<b>Figura 4.14</b> Diagrama de cajas de los valores medios para $t_{1/2}$ (máx.) del $\text{NH}_4\text{-N}$ .....	57
<b>Figura 4.15</b> Comportamiento de lixiviación de $\text{NO}_3\text{-N}$ de las distintas mezclas de NPK/biochar.....	58

<b>Figura 4.16</b> Concentración acumulada de $\text{NO}_3 - \text{N}$ lixiviada de las distintas mezclas de NPK/biochar .....	59
<b>Figura 4.17</b> Comparación de muestras en el método Dunnett para $\text{NO}_3 - \text{N}$ .....	61
<b>Figura 4.18</b> Diagrama de cajas de los valores medios para $t_{1/2}$ (máx.) del $\text{NO}_3 - \text{N}$ .....	61
<b>Figura 4.19</b> Comportamiento de lixiviación de $\text{PO}_4 - \text{P}$ de las distintas mezclas de NPK/biochar .....	62
<b>Figura 4.20</b> Concentración acumulada de $\text{PO}_4 - \text{P}$ lixiviada de las distintas mezclas de NPK/biochar .....	63
<b>Figura 4.21</b> Comparación de muestras en el método Dunnett para $\text{PO}_4 - \text{P}$ .....	65
<b>Figura 4.22</b> Diagrama de cajas de los valores medios para $t_{1/2}$ (máx.) del $\text{PO}_4 - \text{P}$ .....	66
<b>Figura 4.23</b> Comportamiento de lixiviación de $\text{K}^+$ de las distintas mezclas de NPK/biochar .....	66
<b>Figura 4.24</b> Concentración acumulada de $\text{K}^+$ lixiviada de las distintas mezclas de NPK/biochar .....	67
<b>Figura 4.25</b> Comparación de muestras en el método Dunnett para $\text{K}^+$ .....	70
<b>Figura 4.26</b> Diagrama de cajas de los valores medios para $t_{1/2}$ (máx.) del $\text{K}^+$ .....	70
<b>Figura 4.27</b> Diagrama de etapa de empastillado .....	72
<b>Figura 4.28</b> Diagrama de proceso – Elaboración de pastillas NPK/biochar 1:2 .....	73

**“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA  
A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**

# **1. INTRODUCCIÓN**

Martínez Paredes Giancarla Ximena

**Tutor:** PhD. Luis G. López Nina

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Antecedentes y planteamiento del problema

### 1.1.1 Antecedentes

La baja fertilidad del suelo es una preocupación importante en la mayoría de las regiones del mundo. Los suelos de regiones áridas y semiáridas, por lo general, presentan una baja capacidad de retención de agua y bajo contenido en nutrientes lo que dificulta su uso en la producción agrícola (Sim et al., 2021). Las plantas requieren de la presencia de macronutrientes y micronutrientes para crecer, especialmente macronutrientes como nitrógeno (N), fósforo ( $P_2O_5$ ) y potasio ( $K_2O$ ), referido como N-P-K (Purnomo & Saputra, 2021), por lo que se suelen emplear fertilizantes para proveer de estos nutrientes al suelo y mejorar de esta forma su fertilidad.

En las últimas décadas, la aplicación de fertilizantes químicos ayudó a aumentar la producción de alimentos, lo que contribuyó a aproximadamente un 50% más de rendimiento de los cultivos (Wang et al., 2022), por lo que se prevé que el consumo y la demanda de fertilizantes convencionales como la urea, fertilizantes nitrogenados, fosfóricos y potásicos aumentara a lo largo de los años (Sim et al., 2021).

Si bien los fertilizantes juegan un rol importante en la mejora del rendimiento de los cultivos, el uso excesivo de estos supone un grado de contaminación ambiental de agua y suelo, dentro de los cuales se tiene la disminución en el pH, aumento en la disponibilidad de metales pesados, lixiviación y escorrentía de nutrientes entre otros (Chen et al., 2018), además de que la aplicación excesiva de fertilizantes socava gravemente la calidad de las tierras de cultivo a través de la salinización de suelo y agotamiento de la materia orgánica (Wang et al., 2022). La pérdida estimada de fertilizantes en el medio ambiente incluye de 40 a 70% de nitrógeno, 80 a 90% de fósforo y 50 a 70% de potasio (Wang et al., 2022).

La lixiviación de nutrientes en suelos puede afectar a la fertilidad del suelo, acelerar la acidificación del suelo, aumentar los costos de los fertilizantes para los agricultores, reducir el rendimiento de los cultivos, y otros impactos ambientales negativos. El alto contenido de nutrientes en las aguas superficiales y/o subterráneas pueden promover la eutrofización, la producción excesiva de microorganismos acuáticos fotosintéticos en ecosistemas marinos y de agua dulce. Por todo lo mencionado anteriormente se ha visto la necesidad de desarrollar alternativas al uso de fertilizantes químicos.

Los fertilizantes de liberación lenta (SRF por sus siglas en inglés) se definen como fertilizantes que retrasan la disponibilidad de nutrientes para la absorción de la planta después de su aplicación en el suelo (Wang et al., 2022). El uso de fertilizantes de liberación lenta ayuda a liberar gradualmente los nutrientes al suelo a lo largo de la temporada de crecimiento y para proporcionar la mayoría de los nutrientes a la planta sin pérdidas por lixiviación, que puede además reducir la pérdida de ganancias de los agricultores y minimizar el daño potencial al medio ambiente (Kim et al., 2014). Los SRF se elaboran empleando materiales que actúen como barrera (polímeros) o como soporte (biochar, arcilla, zeolita) de los fertilizantes.

El biochar es un material sólido rico en carbono obtenido a partir de la descomposición termoquímica de la biomasa en ausencia de oxígeno (Wang et al., 2022), posee propiedades como estructura porosa, área superficial elevada, gran número de grupos funcionales y una abundancia en elementos minerales (Chen et al., 2018).

El enfoque de la aplicación de biochar en los suelos está recibiendo mucha atención debido a que funciona como un sumidero de carbono para mitigar el calentamiento global, aumenta la capacidad de retención de aguas (Kim et al., 2014; Yao et al., 2012), reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y controla la movilidad de una variedad de contaminantes ambientales como metales pesados, pesticidas y otros contaminantes orgánicos (Wang et al., 2022).

El biochar por sí solo no contiene nutrientes suficientes para lograr un desarrollo adecuado de las plantas, por lo que combinar el biochar con distintos fertilizantes hace que los materiales de biochar sean más adecuados para estimular el crecimiento de las plantas (Chen et al., 2018).

Muchos investigadores han observado que los fertilizantes basados en biochar retrasan la liberación de nutrientes en el suelo y muestran un efecto de liberación lenta, debido a que el biochar adsorbe nutrientes como el nitrato, amonio, fosfato y potasio (Chen et al., 2018), aumentando la fertilidad del suelo y la productividad de los cultivos. Además de la eficiencia de los fertilizantes, el biochar tiene beneficios adicionales que incluyen una mayor textura del suelo, retención de agua, capacidad de intercambio catiónico y diversidad microbiana (Kim et al., 2014), además de que el biochar puede ajustar el pH del suelo, reducir la densidad para mejorar la ventilación de suelo y permeabilidad, y aumentar el rendimiento de los cultivos

significativamente (Chen et al., 2018), por lo que el empleo del biochar en la formulación de fertilizantes puede ser una buena alternativa para mejorar la calidad de los suelos.

### **1.1.2 Diagnóstico**

Los suelos del altiplano boliviano se caracterizan por su baja a moderada fertilidad, además de sus bajos niveles en materia orgánica, nitrógeno, fósforo y cationes básicos, con un pH ligera a moderadamente ácido, presentando una baja disponibilidad en nutrientes (Salm & Castro, 2005) y una baja capacidad de retención de agua. La precipitación, que es la principal fuente de agua para la agricultura, presenta valores de 500 mm/año (altiplano norte), 350 mm/año (altiplano central) y 250 mm/año (altiplano sur) (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2015). Todos estos factores son los que ocasionan que se presente una baja productividad agrícola en el altiplano boliviano.

Para mejorar las propiedades del suelo se realiza el abonado con estiércol vacuno u ovino y en algunos casos se emplean fertilizantes como la urea y el fosfato di amónico (DAP) (Tangara, 2011), sin embargo, el uso de fertilizantes químicos es limitado, debido principalmente al elevado costo que estos presentan, tal y como se indica en un estudio realizado el año 2008 donde se ha demostrado que el uso de fertilizantes en la actividad agrícola boliviana es pequeña debido a su elevado costo a consecuencia de su origen importado o de contrabando (S. Escalera, 2014).

Para poder hacer frente a esta problemática en Bolivia está en construcción la planta de elaboración de fertilizantes NPK en Santivañez, Cochabamba, la cual permitirá la elaboración de fertilizantes bajo distintas formulaciones como el NPK (18-8-18), NPK (15-15-15) y NPK (20-20-20) y también se podrán realizar formulaciones personalizadas a gusto del cliente. La planta tendrá una capacidad de producción de 60000 ton/año (Condori, n.d.).

Se emplearán insumos nacionales como la urea de la planta de Amoniaco, el fosforo de la provincia Capinota en Cochabamba y el potasio de la planta de YLB ubicada en Llipi Llipi del departamento de Potosí. El proceso de producción consta de la molienda de los macronutrientes (urea, roca fosfórica y cloruro de potasio), seguido del mezclado, granulado al vapor, secado y cribado, recubrimiento y ensacado (Deheza, 2022).

Los fertilizantes que serán producidos, a diferencia de los otros fertilizantes comerciales, serán recubiertos o encapsulados con polímeros de modo que se evite la volatilización de nutrientes disminuyendo así la pérdida de macronutrientes (Condori, n.d.).

Muchos de los materiales poliméricos empleados comercialmente son sintéticos como es el caso del poliuretano, polietileno, poliestireno y PVA, los cuales no se pueden degradar fácilmente en el suelo y pueden acumularse a lo largo del tiempo, ocasionando contaminación de los suelos (Lawrencia et al., 2021), por lo que se prefiere el empleo de materiales como el quitosano, celulosa y almidón, sin embargo su aplicación es limitada debido a su baja solubilidad y su inestabilidad a elevada temperatura y pH (Purnomo & Saputra, 2021).

Como alternativa al uso de polímeros está la producción de fertilizantes dispersos en matrices como el biochar, el cual es ambientalmente amigable y tiene un costo de producción más bajo.

La elaboración de fertilizantes de liberación lenta empleando biochar mediante granulación o peletización reduce efectivamente la liberación de nutrientes al aumentar la resistencia a la difusión. Para su elaboración es necesario cargar al biochar con nutrientes lo cual puede realizarse mediante impregnación o mediante mezclas de biochar/fertilizante (Wang et al., 2022).

Por ejemplo, se tiene el trabajo realizado por (Kim et al., 2014) donde se mezcló biochar derivado de pasto con fertilizante líquido y lignina, las mezclas se granularon empleando un molino de pellets. Se obtuvo que la liberación de fósforo del biochar sin modificar fue de 46,3% a las 24 horas y 56,4% a las 432 horas. Cuando el biochar se procesó con 30% de lignina y a 180 °C se liberó 49 a 62 % de fósforo a las 24 horas y 73 a 78 % en 432 horas. Determinándose que la función de la lignina es la de ocasionar tamaños de poro más pequeños, reduciendo el volumen total de poros del biochar, lo que contribuye a la liberación lenta del fósforo.

Por otra parte, se tiene el trabajo de (Shin & Park, 2018) donde se produjeron gránulos a partir de la mezcla de biochar de cáscara de arroz y compost de estiércol variando la combinación entre estas materias primas y empleando una máquina de pellets. Los resultados indican que la liberación de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  y  $\text{PO}_4 - \text{P}$  disminuye a medida que se aumenta el contenido de biochar debido a que aumenta la adsorción de estos en el biochar.

En las pruebas realizadas por (Chen et al., 2018) se elaboró un fertilizante a base de biochar de cáscara de arroz y urea – peróxido de hidrogeno (UHP) encontrándose que las condiciones óptimas para lograr una menor tasa de liberación de nitrógeno fueron de 16,89% de adición de agua con un uso de 25% de caolín y a una relación de fertilizante – biochar de 0,2. La liberación de nitrógeno a estas condiciones fue de 17,63% comparado con la liberación de solo UHP que fue de 68,66%.

De acuerdo a (Zheng et al., 2017) se elaboró biochar de paja de trigo mezclado con fosfato de diamonio, cloruro de potasio y bentonita empleando un dispositivo de granulación de tambor giratorio y vapor de agua como aglutinante. El fertilizante de biochar granulado tenía un total de 18% de N, 9% de  $P_2O_5$  y 10% de  $K_2O$ . En un experimento realizado en campo empleando este fertilizante granular se obtuvo un aumento el rendimiento de grano en un 10,7% y la producción de maíz en un 46,2%, esto debido a la liberación lenta de nutrientes, el aumento del suministro de fósforo y el régimen de humedad.

En el trabajo de (Pogorzelski et al., 2020) se estudió el efecto de la granulación del biochar producido al mezclar biochar de chips de madera con super fosfato triple empleando un granulador rotatorio. En comparación con el superfosfato triple, el biochar granulado tuvo una menor liberación de fósforo.

Finalmente, en el trabajo de (Shi et al., 2020) el biochar granular se preparó mezclando uniformemente biochar, minerales arcillosos (bentonita y sepiolita) y urea para la posterior granulación mecánica utilizando vinagre de madera como aglutinante. Los experimentos de lixiviación indican que la liberación acumulada de nitrógeno se redujo por encima del 70% en comparación con la urea. El experimento en maceta revelo que el brote y la raíz de maíz aumentaron en un 14% y 25% con la aplicación del fertilizante de biochar.

Con toda la información descrita, se tiene que la producción de fertilizante en base a biochar y NPK puede ser una alternativa de bajo costo y ambientalmente amigable al uso de fertilizantes convencionales, además de que puede traer efectos positivos si es aplicado al suelo del altiplano boliviano.

### ***1.1.3 Planteamiento del problema***

Por todo lo descrito anteriormente se tiene como planteamiento del problema del presente proyecto:

- No existencia de estudios realizados respecto a la elaboración de fertilizante en base a biochar mezclado con NPK a distintas proporciones, su potencial uso como fertilizante de liberación lenta a través del análisis de lixiviación de  $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$ ,  $PO_4-P$  y  $K^+$  y su posible aplicación en suelos del altiplano boliviano.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo general***

Obtener un fertilizante de liberación lenta a partir de biochar derivado de residuos de poda modificado con NPK a escala laboratorio.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- Caracterizar las mezclas de fertilizante NPK/Biochar mediante la determinación de área superficial, pH, conductividad y retención de agua, para su potencial aplicación en suelos del altiplano boliviano.
- Determinar el efecto que tiene la relación fertilizante NPK/Biochar en la lixiviación de  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  y  $\text{K}^+$  mediante el uso del análisis de varianza de una sola vía.
- Determinar la relación optima de fertilizante NPK/Biochar que alcance una menor lixiviación de  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  y  $\text{K}^+$ .
- Establecer el proceso de producción del fertilizante NPK/biochar a escala laboratorio, empleando diagramas de flujo.

## **1.2 Alcance, justificación e impactos del proyecto**

### ***1.3.1 Alcance***

El alcance del presente proyecto es de carácter exploratorio, debido a que se pretende determinar la proporción adecuada entre biochar y fertilizante NPK de modo que se logre una liberación más lenta de nutrientes en columnas de lixiviación de suelo a escala laboratorio.

En las columnas de lixiviación se analizaron las concentraciones de los iones  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  y  $\text{K}^+$  que se liberan tras regar diariamente cierta cantidad de agua a las columnas de suelo que contienen las distintas mezclas de fertilizante NPK/biochar.

Con los resultados obtenidos se realiza el análisis de varianza para ver si existe diferencia significativa entre tratamientos, además de determinar el efecto que tiene el biochar en la liberación de nutrientes.

Se describe el proceso de producción a escala laboratorio de modo que en una siguiente etapa se pueda escalar el proceso.

## ***1.3.2 Justificación***

### *1.3.2.1 Justificación académica*

El presente proyecto permitirá aplicar los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera de ingeniería química, principalmente aquellos adquiridos en las materias de química analítica cuantitativa, diseño experimental, preparación y evaluación de proyectos y ética y metodología de la investigación.

### *1.3.2.2 Justificación técnica*

La producción de fertilizantes mediante la granulación o peletización es una de las técnicas más utilizadas, debido a la simpleza de su proceso y a que es fácilmente escalable. Además de que permite reducir la pérdida de biochar en polvo tras su aplicación al suelo a consecuencia de la escorrentía superficial y los fuertes vientos.

### *1.3.2.3 Justificación económica*

El empleo de biochar como alternativa a los polímeros utilizados en la elaboración de fertilizantes de liberación lenta es una opción que podría reducir los costos de producción, ya que muchos de estos materiales de recubrimiento son costosos y necesitan el uso de solventes, además del empleo de equipos de recubrimiento.

Por otra parte, al emplearse residuos de poda se aprovecharían los desechos como materia prima, dándole un valor agregado.

### *1.3.2.4 Justificación social*

Desarrollar una alternativa a los fertilizantes convencionales podría permitir que los agricultores puedan acceder a este, fomentando su aplicación en los suelos y mejorando de esta forma la productividad de los cultivos, lo que a su vez se traduce en una mejora de la calidad de vida.

### *1.3.2.5 Justificación ambiental*

El uso de biochar como alternativa a los polímeros utilizados en la elaboración de fertilizantes de liberación lenta provoca impactos ambientales positivos, debido a que el biochar es un material biodegradable y ambientalmente amigable, además de que su aplicación en suelos ayuda a mejorar las propiedades fisicoquímicas del mismo y actúa como un sumidero de carbono.

Por otra parte, la producción de biochar permitirá realizar un manejo adecuado a los residuos de poda generados, los cuales son simplemente desechados.

### ***1.3.3 Impactos***

El presente proyecto está dirigido como una alternativa ambientalmente amigable al uso de polímeros en la elaboración de fertilizantes de liberación lenta de modo que se puedan reducir costos para así ser más accesibles para los productores agrícolas, mejorando de este modo la productividad de los suelos y así la competitividad del sector productor agrícola nacional.

Los resultados obtenidos en el presente proyecto con el uso de biochar como soporte del fertilizante NPK serán de gran utilidad para poder producir este producto a mayor escala.



**“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA  
A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**

## **2. MARCO TEÓRICO**

Martínez Paredes Giancarla Ximena

**Tutor:** PhD. Luis G. López Nina

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades

Desde el punto de vista agrícola *“el suelo es un sistema disperso constituido por las fases sólida, líquida y gaseosa, formando el soporte mecánico y el sustento de las plantas”*. Bajo esa premisa su estudio se debe dirigir hacia la determinación de propiedades, conservación y mejora del suelo de modo que se pueda garantizar la productividad y calidad del mismo (Navarro García & Navarro García, 2014).

La calidad del suelo según el Comité de la Sociedad de la Ciencia del Suelo Americana puede definirse como *“la capacidad funcional de un tipo específico de suelo para sustentar la productividad animal y vegetal, mantener o mejorar la calidad del agua y aire, y sostener el asentamiento y salud humanos, con límites ecosistémicos naturales o determinados por el manejo”* (Navarro García & Navarro García, 2023).

Un suelo de buena calidad debe ser capaz de cumplir las siguientes funciones (Bautista Cruz et al., 2004):

- Promover la productividad del sistema sin perder sus propiedades físicas, químicas, biológicas
- Aminorar contaminantes ambientales y patógenos.
- Favorecer la salud de las plantas, animales y humanos.

La calidad del suelo va variando con el tiempo y depende del uso que se le brinda y de las prácticas culturales.

La fertilidad es la capacidad del suelo para proporcionar a la planta buenas condiciones de crecimiento y desarrollo como resultado de la interacción entre sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Sánchez V, n.d.).

La productividad es la capacidad que tiene un suelo, en su ambiente natural, para producir un tipo particular de plantas o secuencia de plantas, bajo un sistema específico de manejo (Navarro García & Navarro García, 2023).

## **2.2 Nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal**

Las plantas están conformadas por un 94 a 99,5 % de carbono, hidrogeno y oxígeno; el restante 0,6 a 6 % lo constituyen elementos químicos que son fundamentales para el desarrollo vegetal. Estos elementos nutritivos son proporcionados por las rocas de la litosfera, las cuales se van degradando y disociando por la influencia del agua, convirtiéndose en aniones y cationes, que pueden permanecer en solución o quedarse adheridos a las partículas coloidales del suelo, donde finalmente son absorbidos por las raíces (Navarro García & Navarro García, 2014).

Los elementos esenciales para las plantas pueden clasificarse de la siguiente forma:

*Macronutrientes*, son aquellos que se encuentran en cantidades mayores a 0,05 % en peso seco. Dentro de estos tenemos el fósforo, potasio, nitrógeno, calcio, magnesio y azufre.

*Micronutrientes*, son aquellos que se encuentran en cantidades menores a 0,05 % en peso seco. Dentro de estos tenemos al cobre, hierro, manganeso, boro y zinc.

La forma en que estos elementos son absorbidos por las plantas y las funciones que cumplen se encuentran descritas en la Tabla 2.1.

## **2.3 Propiedades físicas y químicas de los suelos**

Las propiedades físicas y químicas determinan la calidad y productividad de los suelos. Es necesario su conocimiento para poder planificar las actividades de riego, fertilización y labranza. Dentro de las propiedades del suelo más importantes se tiene:

### **2.3.1 Textura**

Se refiere a la proporción de partículas de arena, limo y arcilla en el suelo. Guarda relación con propiedades como la capacidad de retención de agua, la porosidad, la densidad, la estructura entre otros.

Un suelo con mayor porcentaje de arena presenta poca capacidad de retención de agua y nutrientes, también una elevada lixiviación y volatilización de nitrógeno (Fertilab, 2021) a consecuencia del diámetro de sus partículas, comprendido entre 0,05 y 2 mm, facilitando el movimiento de aire y agua. Los suelos con mayor porcentaje de arcillas presentan alta capacidad de retención de agua y nutrientes, ya que las partículas de arcilla presentan

diámetros menores a 0,002 mm, siendo capaces de retener agua y los cationes son retenidos debido a su carga negativa (Fertilab, 2016).

**Tabla 2.1**

*Importancia de los nutrientes en las plantas*

<b>Tipo</b>	<b>Elemento</b>	<b>Forma absorbida</b>	<b>Función en las plantas</b>
Macronutrientes (Extraídos del aire o agua del suelo)	Carbono	CO <sub>2</sub>	Componente fundamental de carbohidratos, proteínas, lípidos y aminoácidos.
	Hidrógeno	H <sub>2</sub> O	Metabolismo, importante en el balance iónico, agente reductor en reacciones de energía a nivel celular.
	Oxígeno	H <sub>2</sub> O, O <sub>2</sub>	Componente de todos los compuestos orgánicos.
Macronutrientes (Extraídos de los sólidos del suelo)	Nitrógeno	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Componente de proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos.
	Fósforo	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Transferencia de energía y metabolismo de proteínas.
	Potasio	K <sup>+</sup>	Importante en la fotosíntesis, transporte de fotosintatos y reserva de almidones.
	Calcio	Ca <sup>+2</sup>	División celular, mantiene la integridad de las membranas. Es importante en la formación y desarrollo uniforme del fruto.
	Magnesio	Mg <sup>+2</sup>	Componente de la molécula de clorofila y cofactor de reacciones enzimáticas. Incrementa la producción de azúcares.
Micronutrientes (Extraídos de los sólidos del suelo)	Azufre	SO <sub>4</sub> , SO <sub>2</sub>	Transfiere energía a la planta.
	Cobre	Cu <sup>+2</sup>	Componente de varias sustancias (hormonas) que permiten el desarrollo de las plantas.
	Hierro	Fe <sup>+2</sup> , Fe <sup>+3</sup>	Formación de proteínas. Crecimiento de la raíz y puntos aéreos y transferencia de energía.
	Manganeso	Mn <sup>+2</sup>	Transporte de electrones, germinación del polen y crecimiento del tubo de polen.
	Zinc	Zn <sup>+2</sup>	Formación de frutos y transporte de electrones.
	Boro	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Metabolismo de carbohidratos en la síntesis de la pared celular.

Nota: Adaptado de “Manual de Fertilizantes y Enmiendas”, por G. Arévalo y M. Castellano, 2009, p.

### **2.3.2 Porosidad**

Es el porcentaje de espacios vacíos con respecto al volumen total del suelo. Es dependiente de la textura, la estructura y de la actividad biológica del suelo. Esta propiedad puede modificar la capacidad de retención de agua, que afecta la tasa de transpiración y fotosíntesis.

Un suelo ideal presenta 50 % de porosidad, formada por un 33 % de poros grandes y un 66 % de poros medianos. Los poros pequeños retienen agua no disponible para las raíces de las plantas. La porosidad de suelos arcillosos presenta valores entre 40 a 60 % mientras que de suelos arenosos esta entre 35 a 50% (Fertilab, 2016).

### **2.3.3 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)**

Es una medida de la cantidad de cargas negativas presentes en la superficie de las partículas del suelo. También es considerada como el número total de cationes intercambiables ( $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Mg^{+2}$ ,  $Na^+$ ,  $Al^{+3}$  y  $H^+$ ) que el suelo puede retener.

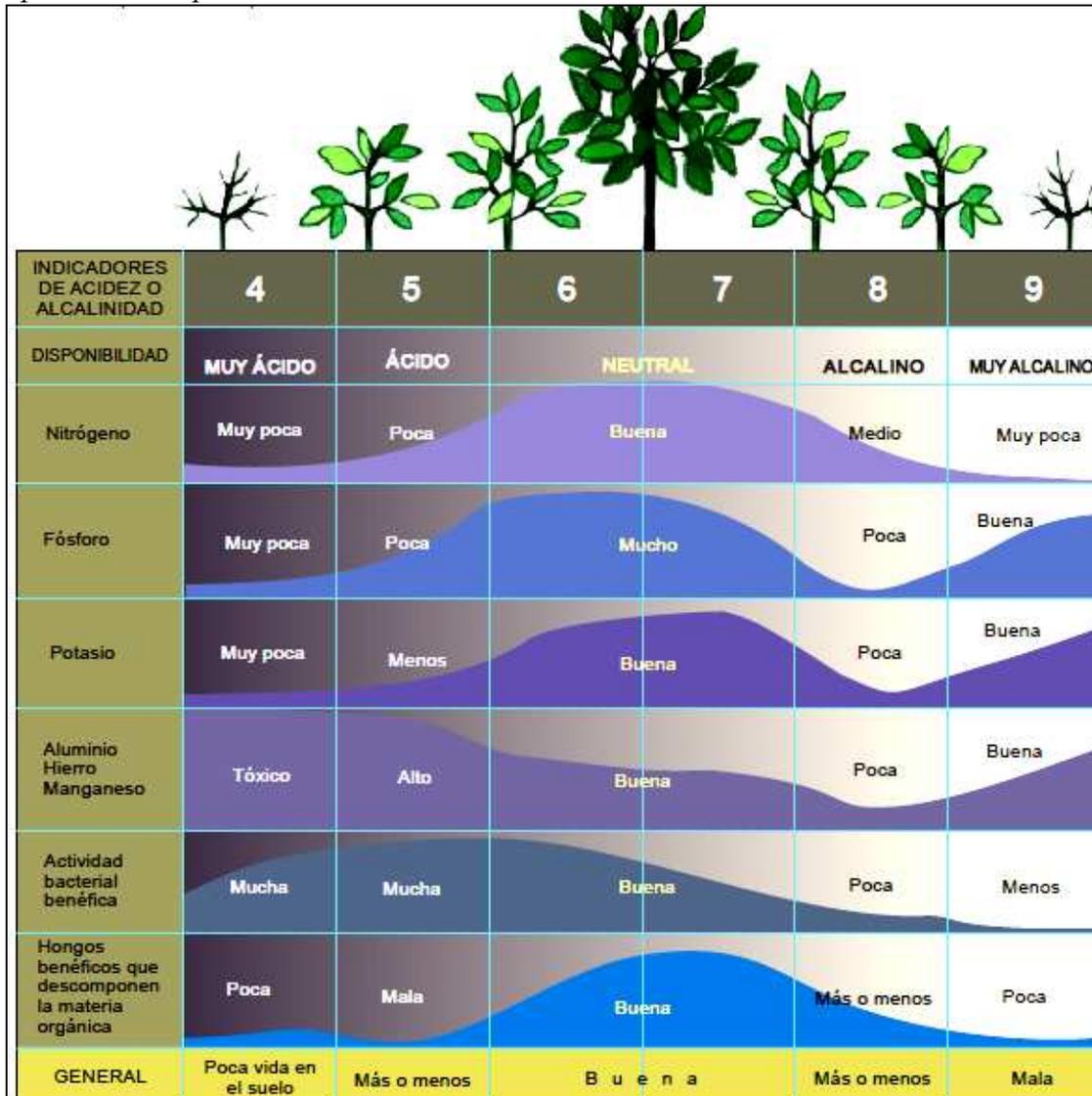
Generalmente los suelos con alta CIC presentan altos contenidos de arcilla y/o materia orgánica, lo que les brinda mayor capacidad de retener nutrientes y, por lo tanto, son suelos más fértiles (Fertilab, 2023).

### **2.3.4 pH**

El pH indica el grado de la alcalinidad o acidez del suelo y tiene una influencia indirecta en los procesos químicos y biológicos, en la disponibilidad, movilidad, solubilidad y absorción de nutrientes (ver Figura 2.1) y en la actividad microbiana.

A la mayoría de las especies cultivadas les favorece un pH entre valores de 5,5 a 7,5. A pH menores a 5,5 el suelo puede verse afectado por el aluminio y sus formas catiónicas solubles que interfieren en la absorción de nutrientes y reducen el crecimiento de las raíces de las plantas (Arévalo & Castellano, 2009).

**Figura 2.1**  
*Interpretación del pH del suelo*



Nota: De “Manual de Fertilizantes y Enmiendas” (p. 24), por G. Arévalo y M. Castellano, 2009.

### 2.3.5 Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica mide la capacidad del agua del suelo para transportar la corriente eléctrica. Los cationes  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y  $\text{NH}_4^{+}$  y los aniones  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$  y  $\text{HCO}_3^{-}$  de las sales disueltas en el agua del suelo transportan cargas eléctricas y conducen la corriente eléctrica. En consecuencia, la concentración de iones determina la CE de los suelos (South Dakota Soil Health Coalition, 2023).

En la agricultura, la CE se ha utilizado principalmente como medida de la salinidad del suelo, de acuerdo a la Tabla 2.2:

**Tabla 2.2**

*Tipos de salinidad y CE (1 dS/m = 1 mmhos/cm)*

CE [dS/m]	Tipo de salinidad
0 – 2	No salino
2 – 4	Ligeramente salino
4 – 8	Poco salino
8 – 16	Moderadamente salino
≥ 16	Fuertemente salino

Nota: Adaptado de “National Soil Survey Handbook” (p. 618-A.22), por USDA, 2012.

La conductividad eléctrica no afecta directamente al crecimiento de las plantas, pero se ha utilizado como un indicador indirecto de la cantidad de nutrientes disponibles para la absorción de las plantas y los niveles de salinidad.

Una CE alta puede servir como indicación de problemas de salinidad que impiden el crecimiento de los cultivos (incapacidad para absorber agua incluso cuando está presente) y la actividad microbiana (South Dakota Soil Health Coalition, 2023).

#### **2.4 Fertilizantes**

Los fertilizantes son materiales orgánicos e inorgánicos cuya principal función es la de proporcionar nutrientes a las plantas y ser capaces de mejorar su crecimiento, lo que a su vez se traduce en un aumento en la producción y rendimiento de las cosechas (Navarro García & Navarro García, 2023).

Los fertilizantes son derivados de una gran variedad de materiales naturales y sintéticos y están disponibles en forma líquida y sólida (polvo, gránulos, cristales, pastillas).

Dentro de los fertilizantes se pueden considerar los siguientes nutrientes:

**Nutrientes primarios:** N, P y K

**Nutrientes secundarios:** S, Na, Ca, Mg

**Micronutrientes:** B, Co, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn

En general, la eficiencia del fertilizante depende de las características del suelo, del manejo del cultivo y de las condiciones climáticas.

#### **2.4.1 Tipos de fertilizantes**

Los fertilizantes pueden ser clasificados bajo diversos criterios (Navarro García & Navarro García, 2023):

##### *2.4.1.1 Por la forma en la que se encuentra el elemento fertilizante*

**Fertilizantes naturales:** Obtenidos de depósitos o yacimientos minerales, y que se comercializan tras ser tratados por procesos físicos de granulado y tamizado.

**Fertilizantes sintéticos:** Productos obtenidos mediante un proceso industrial. Pueden ser inorgánicos (de origen mineral), orgánicos (de origen animal o vegetal), organominerales (de origen orgánico y mineral) y biofertilizantes (contienen microorganismos vivos).

##### *2.4.1.2 Por el número de elementos aportados*

**Fertilizantes simples:** Presentan solo uno de los tres macronutrientes esenciales principales, los cuales pueden ser nitrogenados (urea), fosfatados (superfosfato simple) o potásicos (cloruro de potasio). Algunos de los fertilizantes simples comúnmente utilizados se encuentran descritos en la Tabla 2.3.

**Fertilizantes compuestos:** Presentan al menos dos de los nutrientes principales, pueden ser binarios (DAP) o ternarios (NPK). Los grados de los fertilizantes compuestos o multinutrientes varían dependiendo a los requisitos de los cultivos, siendo los más comunes el NPK 15 – 15 – 15, NPK 20 – 20 – 20, NP 28 – 28 – 0. Algunos de los fertilizantes compuestos más utilizados se describen en la Tabla 2.5. También se tiene el NPK balanceado, el cual se caracteriza por que los porcentajes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O presentan el mismo valor.

##### *2.4.1.3 Por la velocidad de acción*

**Fertilizantes de acción rápida:** Altamente solubles, disposición rápida de nutrientes.

**Fertilizantes de acción lenta:** La aparición del elemento fertilizante en el suelo depende de un recubrimiento o de una limitada solubilidad.

**Fertilizantes con propiedades inhibidoras:** Compuestos que mejoran la eficacia de la asimilación del nitrógeno por la planta, inhibiendo alguna transformación que implicaría pérdida de este elemento (nitrificación).

**Tabla 2.3**

*Fertilizantes simples importantes*

Nombres comunes (fórmulas)		%N	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%K <sub>2</sub> O
Sulfato amónico	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21		
Nitrato amónico	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	33 – 34,5		
Urea	CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	45 - 46		
Superfosfato simple	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> + CaSO <sub>4</sub>		16 – 20	
Superfosfato triple	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>		46	
Roca fosfórica	-		20 - 40	
Cloruro de potasio	KCl			60
Sulfato de potasio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			50

Nota: Adaptado de “Los fertilizantes y su uso”, por Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes, 2002, p. 38.

**Tabla 2.4**

*Fertilizantes compuestos - rango de contenidos de nutrientes*

Tipo de fertilizante	%N	%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%K <sub>2</sub> O
NPK	5 – 26	5 - 35	5 - 26
DAP	16 - 18	42 – 48	-
MAP	11	52	-
NP	20 - 26	6 - 34	-
PK	-	6 - 30	6 - 30

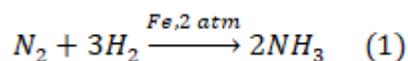
Nota: Adaptado de “Los fertilizantes y su uso”, por Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes, 2002, p. 39.

## 2.4.2 Tecnologías de producción de fertilizantes

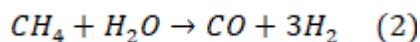
### 2.4.2.1 Fertilizantes nitrogenados

Los fertilizantes nitrogenados más importantes son: nitrato de amonio, sulfato de amonio y la urea. Todos tienen como material de partida al amonio derivado del proceso Haber – Bosch en el cual, el hidrogeno (proveniente del gas natural) y el nitrógeno (proveniente del aire)

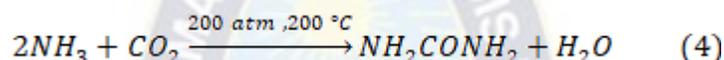
reaccionan a altas presiones y en presencia de un catalizador de hierro, de acuerdo a la reacción (Amurrio, 2004):



El hidrogeno se consigue del proceso de obtención de gas de síntesis (Ecuación 2) y de la reacción de desplazamiento (Ecuación 3).

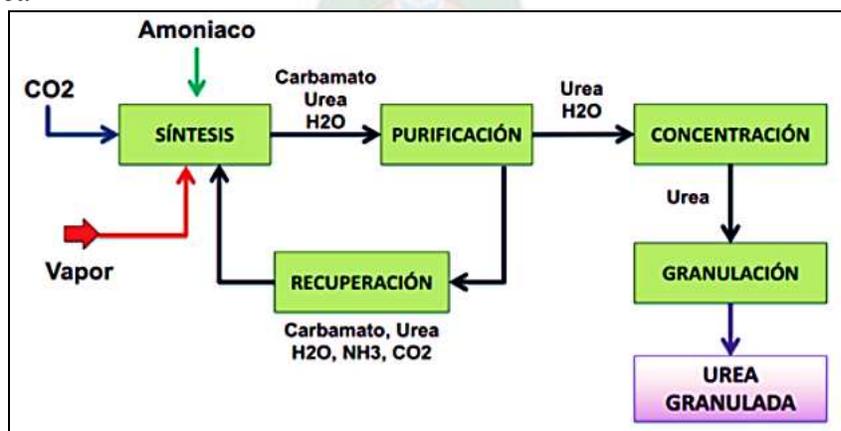


Posteriormente, para la producción de la urea, el amoniaco reacciona con el CO<sub>2</sub> a 200 °C y 200 atm de presión, de acuerdo a la siguiente ecuación:



La Planta de Urea de YPFB emplea la tecnología Toyo, la cual indica que la síntesis de urea está comprendida por un reactor que opera a 190 °C y con una relación molar 4/1 de NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub>. La corriente que sale del reactor consiste en una mezcla de urea, carbamato amónico no convertido, agua y amoniaco, que son alimentados a una columna de stripping donde se separa el amoniaco y el carbamato se descompone. La corriente de salida de la columna de stripping contiene un 12 % de urea y se purifica en las secciones posteriores, donde finalmente es granulada.

**Figura 2.2**  
Proceso de urea



Nota: De *Bolivia inicia la industrialización del gas*, por YPFB, 2017  
(<https://www.yxfb.gob.bo/es/urea>)

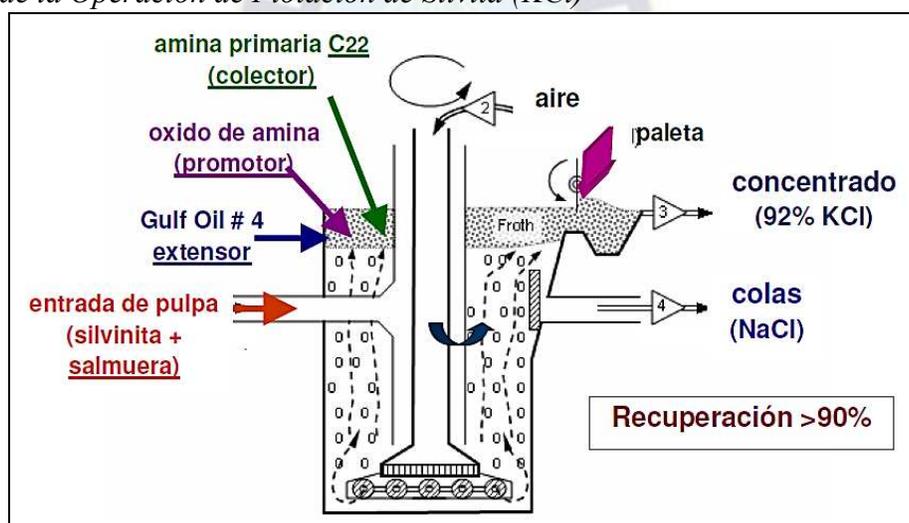
#### 2.4.2.2 Fertilizantes potásicos

El principal fertilizante potásico es el cloruro de potasio (KCl). El proceso de producción se realiza separando la silvita (KCl) de la halita (NaCl) que se encuentran presentes en la silvinita (NaCl + KCl) cosechada de las costras evaporíticas secas. Esta separación se realiza mediante la flotación de la silvita usando una amina primaria (RNH<sub>2</sub>) de cadena carbónica larga (R = C<sub>22</sub>) como colector catiónico y un alcohol compuesto como espumante. La amina primaria se adsorbe a las partículas de KCl para flotarlas y sacarlas de la celda por medios mecánicos. También se añade fuel – oil para dar mayor hidrofobicidad al KCl (agente extensor) y un oxido de amina que actúa sobre la espuma haciéndola más resistente (S. J. Escalera, 2015).

El proceso de producción se encuentra descrito en la Figura 2.3.

**Figura 2.3**

*Diagrama de la Operación de Flotación de Silvita (KCl)*



Nota: De "Producción de Potasio en Bolivia", de S. Escalera, 2015, p. 6.

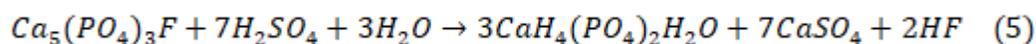
#### 2.4.2.3 Fertilizantes fosfatados

Los fertilizantes en base a fósforo están elaborados a partir de la roca fosfórica o fosforita, la cual está formada principalmente por apatita.

La mayor parte de la roca fosfórica se extrae mediante técnicas de minería a cielo abierto, posteriormente pasa por un proceso de tamizado donde se eliminan algunas impurezas. La roca fosfórica puede ser utilizada para aplicación directa al suelo como fertilizante o puede ser empleada para la producción de fertilizantes fosfatados solubles como el superfosfato simple y triple, para lo cual es necesario que la roca fosfórica se someta a un proceso de beneficiado en

el que se remueven las impurezas (arena, arcilla, óxidos de hierro), este puede realizarse mediante flotación, lavado, calcinación entre otros (International Plant Nutrition Institute, 2010).

La roca fosfórica beneficiada puede ser empleada para la obtención de superfosfato simple, mediante el empleo de ácido sulfúrico, de acuerdo a la siguiente reacción (Soto, 2000):



Dentro de los depósitos de roca fosfórica que se encuentran en el territorio boliviano, el de Capinota ubicado en el departamento de Cochabamba es la mayor reserva de roca fosfórica en Bolivia, con concentraciones de  $\text{P}_2\text{O}_5$  de 12 a 25 % (Navas Alvarado, 2009). La composición de la roca fosfórica proveniente de Capinota se encuentra en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5**

*Composición química porcentual de tres muestras de roca fosfórica Capinota*

	<b>Muestra 1</b>	<b>Muestra 2</b>	<b>Muestra 3</b>
CaO	22,10	23,80	28,10
$\text{P}_2\text{O}_5$	16,30	16,30	19,90
F	2,20	2,00	2,00
$\text{CO}_2$	1,00	2,00	5,20
$\text{Na}_2\text{O}$	0,20	0,20	0,20
MgO	0,16	0,26	0,47
$\text{K}_2\text{O}$	0,24	0,23	0,27
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,90	1,90	2,60
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	7,00	6,20	6,70
$\text{SiO}_2$	39,60	42,50	27,40
S	0,07	0,07	0,30
SrO	0,24	0,07	0,20
BaO	0,30	0,20	0,70
$\text{TiO}_2$	0,30	0,37	0,26
MnO	0,30	0,37	0,26

Nota: De “Eficiencia agronómica de la roca fosfórica en suelos de Bolivia”, por J. Bellot, 1991, p. 100

### **2.4.3 Entradas y salidas de los nutrientes**

#### **2.4.3.1 Nitrógeno**

La presencia de nitrógeno en el suelo se debe a los siguientes procesos:

- Fijación o captura de nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) debido a la presencia de bacterias fotosintéticas.
- Liberación de nitrógeno en forma de  $NO_3^-$  por descomposición microbiana de la materia orgánica muerta en el suelo.
- Aporte de los fertilizantes nitrogenados (Novoa et al., n.d.).

El nitrógeno se pierde del suelo debido a las siguientes causas:

- Extracción y captura por las plantas, las cuales requieren grandes cantidades de nitrógeno para formar sus biomasas.
- Pérdidas por lixiviación hacia capas inferiores de la tierra.
- Pérdidas por escurrimiento superficial de aguas.
- Pérdidas por volatilización a la atmósfera (Novoa et al., n.d.).

#### **2.4.3.2 Fósforo**

Las principales vías de aporte de fósforo al suelo son la descomposición microbiana de los residuos orgánicos, la fertilización y las reservas del suelo. Por otra parte, el fósforo se pierde del suelo mediante la extracción por parte de las plantas, por el escurrimiento de aguas superficiales y por la lixiviación (Novoa et al., n.d.).

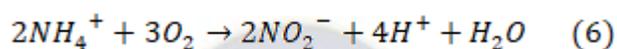
#### **2.4.3.3 Potasio**

El potasio se encuentra en el suelo a consecuencia de la descomposición de minerales ricos en potasio, permaneciendo en la solución del suelo (como ion soluble  $K^+$ ) donde es atrapado por los coloides del suelo.

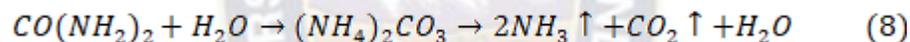
Las pérdidas de potasio ocurren a consecuencia de la extracción por los cultivos, escurrimiento de agua superficial y lixiviación en profundidad (Novoa et al., n.d.).

#### 2.4.4 Efectos de los fertilizantes en el medio ambiente

Todos los fertilizantes que contienen amonio están expuestos a pérdidas por volatilización. Los fertilizantes nitrogenados que contienen amonio incrementan la acidez del suelo al transformarse en  $\text{NO}_3^-$  en el proceso de nitrificación. El sulfato de amonio y el nitrato de amonio aplicados al suelo se disocian liberando amonio, que se convierte en nitrato a través de la oxidación biológica (nitrificación) realizada por bacterias nitrosomas (transformación en nitritos) y Nitrobacter (oxidación a nitratos).



La nitrificación produce un exceso de  $\text{H}^+$  que acidifica el suelo. En el caso de la urea, cuando es aplicada al suelo, es atacada por la enzima ureasa facilitando la hidrólisis del material. La primera reacción forma carbonato de amonio inestable, el cual crea un ambiente alcalino que hace que el carbonato de amonio se descomponga en  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ .



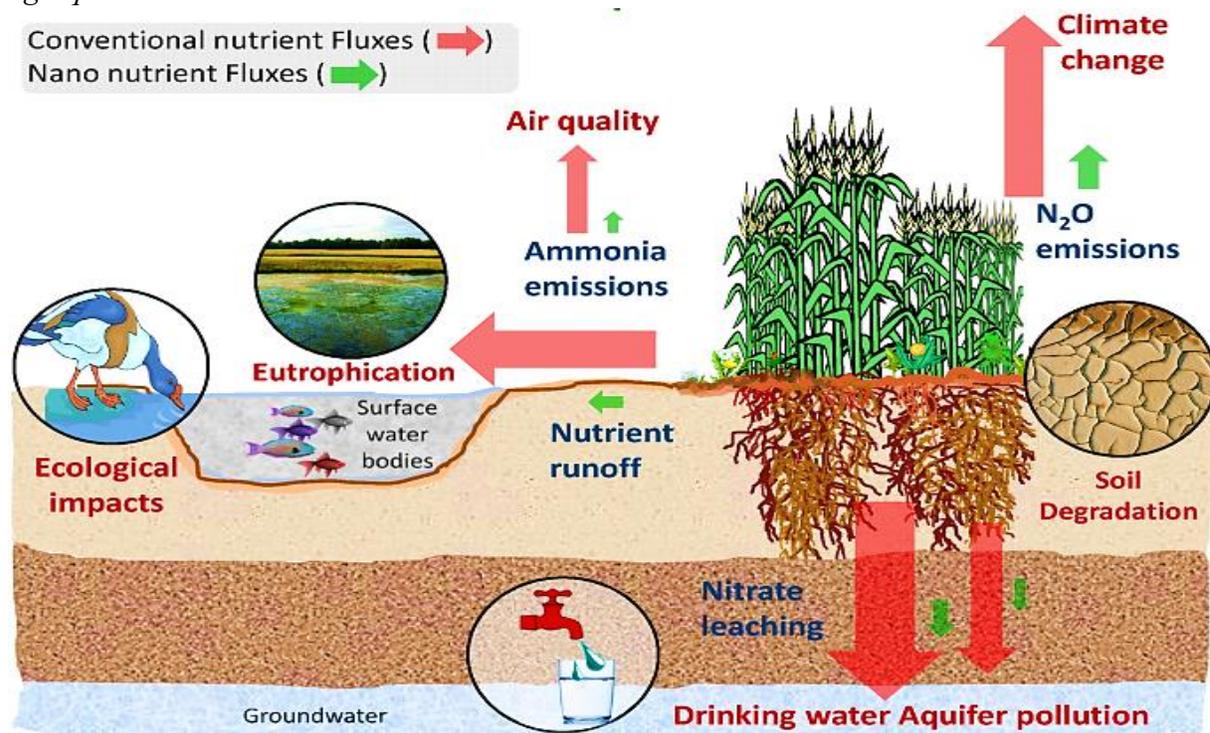
El  $\text{NH}_3$  formado al final de estas reacciones se volatiliza fácilmente, perdiéndose una gran cantidad de nitrógeno. El  $\text{NH}_3$  en contacto con el agua se transforma en  $\text{NH}_4^+$  permaneciendo se esta forma estable en el suelo.

El exceso en la aplicación de fertilizante puede ocasionar la acumulación de grandes concentraciones de nitrato y amoniaco en las aguas subterráneas. El amoniaco en concentraciones superiores a 0,02 ppm es letal para la vida acuática (Marsh et al., 2020).

El exceso de nitrógeno y fosforo puede ocasionar la eutrofización, que es el crecimiento acelerado de algas en los cuerpos de agua, lo que ocasiona una disminución en el contenido de oxígeno disuelto, lo que eventualmente asfixiará a los peces y otras especies acuáticas (Marsh et al., 2020).

**Figura 2.4**

*Representación esquemática de una visión general de los efectos de los derrames agroquímicos en el medio ambiente*



Nota: De “Switching to nanonutrients for sustaining agroecosystems and environment: the challenges and benefits in moving up from ionic to particle feeding” de AK. Bhardwaj et al., 2022, Journal of Nanobiotechnology, p. 19 (<https://doi.org/10.1186/s12951-021-01177-9>)

#### **2.4.5 Mercado de fertilizantes en el mundo**

En el periodo 2001 – 2019 Europa fue el mayor exportador de fertilizantes (valor de exportación acumulado de 384 404 millones de USD), seguido de Asia (valor de exportación acumulado de 214 926 millones de USD). En el año 2019, Sudamérica exportó fertilizantes por un valor de 784 millones de USD, siendo Chile el mayor exportador de fertilizantes de la región concentrando 55 % del valor de exportación, seguido de Brasil con el 17% (Bernabé Lang, 2020).

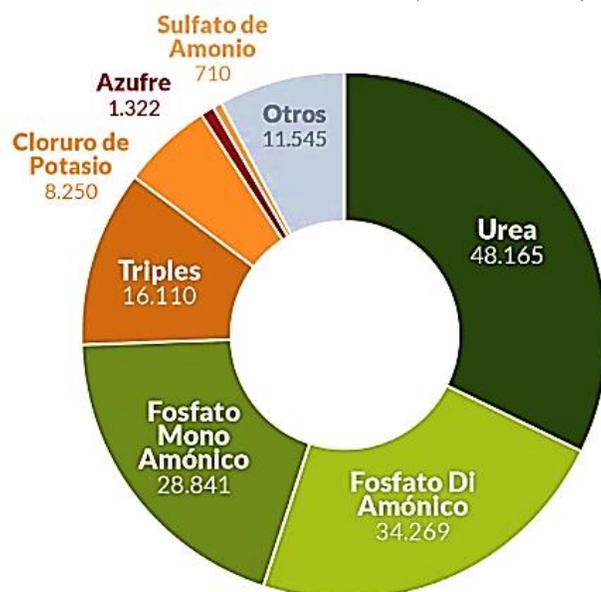
Con respecto a las importaciones, en el periodo 2001 – 2019 Asia fue el continente más demandante (con un valor de importación acumulado de 349 793 millones de USD), seguido de Europa (valor de importación acumulado de 251 777 millones de USD) y Sudamérica (166 124 millones de USD) (Arévalo & Castellano, 2009).

#### 2.4.6 Mercado de fertilizantes en Bolivia

El consumo de fertilizantes, de acuerdo al Plan Nacional de Fertilización y Nutrición Vegetal de la Asociación de Productores de Oleaginosas y Trigo (ANAPO) indica que el 2018 se emplearon 149 mil toneladas de fertilizante, siguiendo la distribución de la Figura 2.5.

**Figura 2.5**

*Tipo de fertilizantes más utilizados en Bolivia en 2018 (en toneladas)*



Nota: La categoría Otros corresponde a fertilizantes en base a NPK más macro y micronutrientes. De *Insumos agrícolas: ¿Una nueva industria nacional de fertilizantes y agroquímicos?*, por G. Villalobos, Fundación Solón, 2022 (<https://fundacionsolon.org/2022/04/13/insumos-agricolas-una-nueva-industria-nacional-de-fertilizantes-y-agroquimicos/>)

Con respecto a la importación de fertilizantes, de acuerdo al SENASAG y APIA (2019), durante el año 2018 se importaron más de 70 mil toneladas de fertilizante, donde la mayor parte corresponde al fosfato monoamónico, seguido del fosfato diamónico (DAP) y la urea (INIAF et al., 2019).

De acuerdo a YPFB, el año 2018 se comercializaron 31 mil toneladas de urea en el mercado boliviano y las exportaciones fueron de 240 mil toneladas (INIAF et al., 2019), siendo Brasil y Argentina los consumidores principales de los fertilizantes producidos en Bolivia (Arévalo & Castellano, 2009).

## 2.5 Biochar

El biochar es un material sólido rico en carbono obtenido a partir de la descomposición termoquímica de la biomasa en ausencia de oxígeno. Presenta propiedades físicas (morfología de superficie, área superficial, porosidad) y químicas (composición y grupos funcionales), lo que lo vuelve un material potencial para ser utilizado como adsorbente (Premalatha et al., 2023), tanto en el tratamiento de aguas como en su aplicación en la agricultura.

### 2.5.1 Procesos de producción

La producción de biochar tradicionalmente se realiza de dos formas: En la primera, la biomasa se aglomera en los pozos del suelo, cubriéndolo posteriormente con más capas de suelo para luego ser quemados lentamente. En la segunda forma, la biomasa se quema al aire libre y luego se cubre inmediatamente con suelo (Alkharabsheh et al., 2021).

Actualmente el biochar puede ser producido por diferentes métodos de conversión termoquímica:

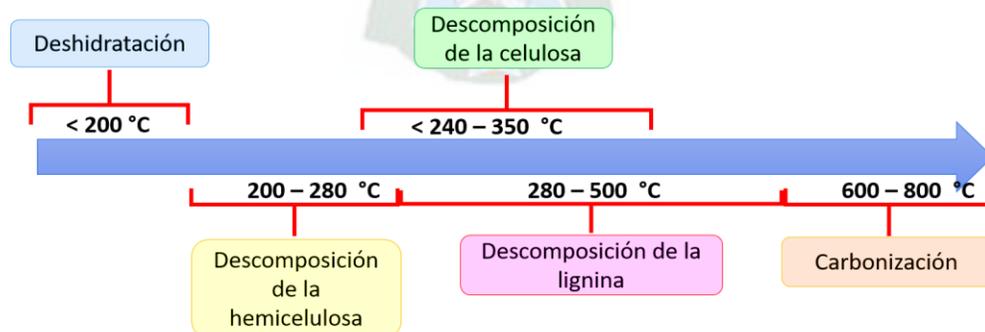
#### 2.5.1.1 Pirólisis

En este proceso la degradación térmica de la biomasa ocurre en un rango de temperaturas de 250 °C a 900 °C bajo parcial o total ausencia de oxígeno. Permite además obtener otros productos como el gas de síntesis y los bioaceites.

Durante el proceso de pirólisis los componentes lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y la lignina) se descomponen a diferentes temperaturas tal y como se indica en la Figura 2.6.

**Figura 2.6**

*Etapas de la descomposición de la biomasa a través del proceso pirolítico*



Nota: De “Pyrolysis: A sustainable way to Generate Energy from Waste” de C. Zaman et al., 2017, Pyrolysis, p. 4 (doi: 10.5772/intechopen.69036)

El porcentaje de recuperación de cada producto depende de varios factores como la alimentación, la temperatura de pirólisis, y la velocidad de calentamiento. En base a eso se puede trabajar bajo pirólisis lenta y rápida (Alkharabsheh et al., 2021).

En la pirólisis lenta la biomasa se descompone a una velocidad de calentamiento de 5 a 7 °C/min y por un tiempo de residencia de al menos una hora. El proceso generalmente ocurre a presión atmosférica con energía provista por una fuente externa. En la pirólisis lenta se produce mayormente biochar (35 – 45%), seguido de bioaceite y biogás (Alkharabsheh et al., 2021). La pirólisis lenta se puede realizar en reactores de lecho fijo cilíndrico, hornos rotatorios, lecho empaquetado (Collard et al., 2016).

En la pirólisis rápida la velocidad de calentamiento es mayor comparada con la pirólisis lenta, además de que es menor su tiempo de residencia (Collard et al., 2016). En este proceso el rendimiento de biochar es menor al 20% y hay mayor producción de bioaceites. La pirólisis rápida puede ser llevada a cabo en un reactor auger, cono rotatorio, lecho fluidizado entre otros (Alkharabsheh et al., 2021).

#### *2.5.1.2 Torrefacción*

También conocido como mild pirolisis, se trabaja a temperaturas entre 200 – 300 °C por unos cuantos minutos a horas a una velocidad de calentamiento rápida en ausencia de oxígeno (Alkharabsheh et al., 2021). Sigue cuatro etapas: en la primera etapa se calienta la biomasa hasta una temperatura de 90 a 105 °C. En la segunda etapa, el agua libre presente en la biomasa se evapora. En la tercera etapa, se mantiene la biomasa a la temperatura de torrefacción y finalmente sigue el enfriamiento (Junsatien et al., 2013).

El proceso de torrefacción puede ser desarrollado en reactores de lecho fijo, reactores de microondas, de lecho fluidizado, reactores rotatorios (Junsatien et al., 2013), dentro de estos los reactores auger son los mayormente utilizados debido a su simple instalación, en escala industrial, poca demanda de gas inerte, y bajo costo (Alkharabsheh et al., 2021).

#### *2.5.1.3 Carbonización hidrotérmica*

Es desarrollado en un rango de temperaturas de 180 – 250 °C, bajo presión autógena con un tiempo de residencia que oscila entre 0,5 – 8 horas. Durante el proceso la biomasa se mezcla con agua y se coloca en un reactor cerrado (Yaashikaa et al., 2020).

En la Tabla 2.6 se resumen los distintos métodos de conversión termoquímica junto con los rendimientos de biochar, bioaceite y gas de síntesis esperados.

**Tabla 2.6**

*Técnicas de conversión termoquímica y sus condiciones de proceso*

<b>Técnica</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Biochar (%)</b>	<b>Bioaceite (%)</b>	<b>Syngas (%)</b>
Pirólisis lenta	300 – 700	30 – 180 min	25 - 35	20 - 50	20 – 50
Pirólisis rápida	400 – 600	< 2 s	10 - 30	50 - 70	15 - 20
Torrefacción	200 - 300	10 – 60 min	80	0	20
Carbonización hidrotermal	180 - 300	1 – 16 h	50 - 80	5 - 20	2 - 5

Nota: De “ A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy” de P. Yaashikaa etl al.,2020, Biotechnology Reports, p. 2 (<https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>)

### **2.5.2 Impactos del biochar en el suelo**

Las propiedades fisicoquímicas del suelo tienen un efecto significativo en la toma de nutrientes y su retención, en el crecimiento de los cultivos y su productividad. Los estudios han mostrado que el biochar tiene el potencial de mejorar las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, creando un ambiente amigable para el desarrollo y crecimiento de las plantas (Alkharabsheh et al., 2021).

También permite tratar metales pesados que se acumulan en el suelo como el cadmio, cobalto, cobre, cromo, manganeso, níquel y plomo, transformándolos en formas menos solubles y no disponibles (Premalatha et al., 2023).

La aplicación de biochar al suelo influye en su humectabilidad, infiltración y retención de agua, la agregación y la estabilidad. También ayuda a mejorar la porosidad, lo que resulta en una reducción de la densidad aparente y por lo tanto, un aumento en la tasa de infiltración (Alkharabsheh et al., 2021). Todas las mejoras en las propiedades físicas se deben a que el biochar presenta alta porosidad, naturaleza adsorbente y su contenido de carbono orgánico total.

Dentro de las propiedades químicas el biochar tiene un efecto encalador con los suelos ácidos, debido a que los grupos funcionales cargados negativamente se unen a los protones del suelo aumentando de esta forma el pH. La conductividad eléctrica también se ve afectada ya que el biochar produce un aumento en la conductividad eléctrica y ayuda a mitigar el estrés salino (Alkharabsheh et al., 2021).

El biochar ha ganado atención recientemente debido a su potencial al mejorar la fertilidad del suelo. El biochar tiene la capacidad de adsorber y retener cationes ya que tiene una mayor área superficial y carga negativa. Al retenerse los nutrientes se mejora la eficiencia del uso de fertilizantes, reduciendo de ese modo la dependencia en fertilizantes sintéticos (Alkharabsheh et al., 2021) y permitiendo el desarrollo de fertilizantes de liberación lenta.

## **2.6 Fertilizantes de liberación lenta**

Los fertilizantes de liberación lenta están diseñados para liberar nutrientes a tasas que coinciden con los requisitos específicos de la planta durante un periodo prolongado.

Dependiendo al proceso de producción estos pueden ser: fertilizantes recubiertos y fertilizantes dispersos en matriz.

### **2.6.1 Fertilizantes recubiertos**

Los fertilizantes recubiertos, también conocidos como fertilizantes de liberación controlada (CRF por sus siglas en inglés) utilizan la forma sólida del fertilizante (urea, DAP, NPK) como material central y se emplean recubrimientos que pueden ser materiales inorgánicos (azufre, bentonita, fosfoyeso, hidroxapatita, zeolita), polímeros orgánicos sintéticos (poliuretano, polietileno, poliestireno, PVA) o naturales (almidón, quitosano, celulosa) (Lawrencia et al., 2021).

El proceso de producción se lleva a cabo recubriendo los gránulos de fertilizante con el material escogido, el cual debe ser previamente fundido o disuelto en un solvente en el cual el polímero sea soluble. Esta operación se realiza mediante el recubrimiento en tambor rotatorio, recubrimiento en bandeja, recubrimiento en lecho fluidizado o recubrimiento por inmersión [1]. Muchos de los polímeros empleados como recubrimiento no se pueden degradar fácilmente en el suelo y pueden acumularse a lo largo del tiempo, ocasionando contaminación de los suelos (Lawrencia et al., 2021), por lo que se prefiere el empleo de materiales como el

quitosano, celulosa y almidón, sin embargo su aplicación es limitada debido a su baja solubilidad y su inestabilidad a elevada temperatura y pH (Purnomo & Saputra, 2021).

### **2.6.2 Fertilizantes dispersos en matriz**

También conocidos como fertilizantes de liberación lenta (SRF por sus siglas en inglés), tiene un proceso de producción más sencillo y es ampliamente utilizado en países en desarrollo debido a su bajo costo. En el caso de esta metodología de producción la distribución de las partículas de fertilizante dentro de la matriz no es homogénea, lo que dificulta la predicción del perfil de liberación de nutrientes.

Como matrices se suelen emplear arcillas, zeolitas y carbón. El uso de zeolita puede aumentar la capacidad de intercambio catiónico y bajar la acidez y en el caso de los carbones incrementa el contenido de carbón en el suelo mientras sirve como medio para el crecimiento de los microorganismos del suelo (Purnomo & Saputra, 2021).

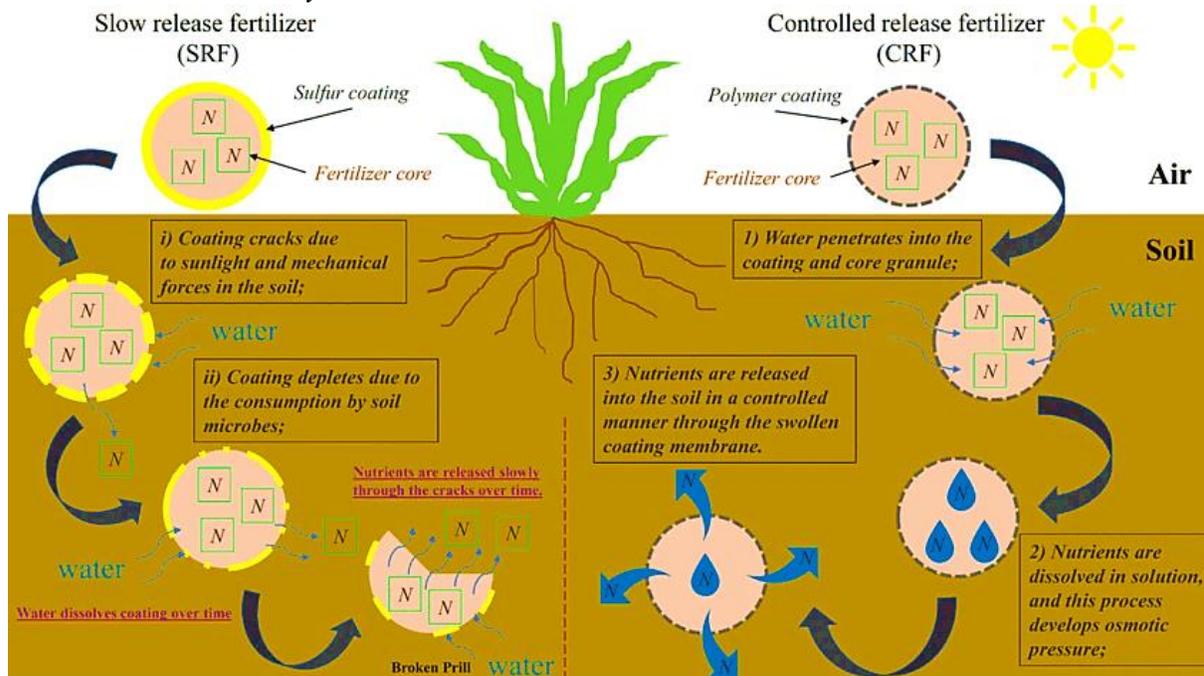
El proceso de producción consiste en el pretratamiento (reducción del tamaño), formulación, granulación o peletización y secado del producto. Se prefiere el uso de máquinas peletizadoras debido a que se emplea poca cantidad de agua (Purnomo & Saputra, 2021). La producción de SRF tiene un costo de producción más bajo que el CRF y se adapta fácilmente para cumplir con la formulación de un cultivo específico.

Los SRF en base a biochar pueden realizarse de dos formas: la carbonización de biomasa peletizada que contiene nutrientes y peletización de mezclas de biochar/fertilizante. En el primer caso es necesario impregnar el biochar peletizado con soluciones ricas en NPK debido al bajo contenido de nutrientes derivados de la biomasa. En cuanto al último método, después de mezclar suficiente biochar y partículas de fertilizante con un tamaño uniforme, la granulación se realiza mediante granulación con disco o extrusión mecánica y se suelen emplear aglutinantes para el proceso (Wang et al., 2022).

Por lo general, los SRF son descompuestos microbiológicamente o pueden quebrarse al entrar en contacto con el agua, liberando de esa forma los nutrientes, mientras que los CRF absorben el agua de riego, penetrando el material polimérico y disolviendo los nutrientes presentes en su núcleo, siendo liberados lenta y controladamente, dependiendo del espesor del recubrimiento, tal y como se observa en la Figura 2.7.

**Figura 2.7**

*Mecanismo de los SRF y CRF*



Nota: De “Contemporary strategies for enhancing nitrogen retention and mitigating nitrous oxide emission in agricultural soils: present and future” de S. Li & G. Chen, 2019, Environment, Development and Sustainability, p. 22 (<https://doi.org/10.1007/s10668-019-00327-2>)

### **2.6.3 Lixiviación de nutrientes en columna de suelo**

La lixiviación es el proceso de transferencia de componentes desde un material en fase sólida hacia la fase líquida con la que entra en contacto. La liberación de componentes se rige por procesos químicos y mecanismos de transferencia de masa basados en la composición química y las propiedades físicas del material sólido junto con el pH y la composición del líquido en contacto. En la Figura 2.8 se muestra los factores internos y externos que influyen en la tasa de lixiviación en un escenario de liberación genérico.

Dentro de las propiedades físicas del suelo, el tamaño de partícula, la permeabilidad y la porosidad influyen en la velocidad con la cual las sales solubles pasan a través del lecho de suelo.

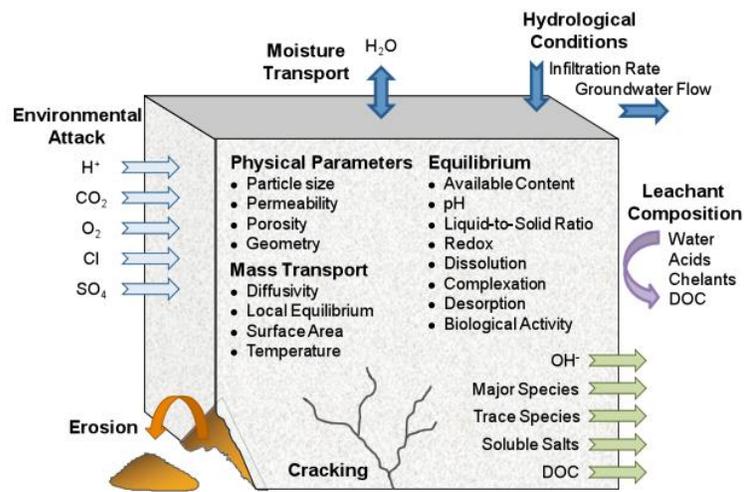
El pH y la composición del líquido de contacto influyen en procesos tales como la adsorción, desorción, precipitación y solubilidad de los compuestos.

También influye la relación líquido – sólido (L/S), siendo óptima una relación L/S menor a 1 ml/g para material de campo poroso completamente saturado, tal y como es el caso de muestras de suelo, residuos y materiales cementosos.

En general, las pruebas de lixiviación de nutrientes deben estar diseñadas para simular la liberación bajo condiciones de campo.

**Figura 2.8**

*Factores internos y externos que influyen el proceso de lixiviación*



Nota: De “Background Information for the Leaching Environmental Assessment Framework (LEAF) Test Methods” de A. Garrabrants et al., 2010, EPA, p. 4.

Para poder realizar el escalamiento de las columnas de lixiviación de suelo se pueden aplicar los criterios de similitud geométrica y cinemática. Se aplica la similitud geométrica con el objetivo de determinar el diámetro y la altura de la columna a mayor escala, de acuerdo a la siguiente expresión (Anaya & Pedroza, 2008):

$$\frac{H_1}{D_1} = \frac{H_2}{D_2} \quad (9)$$

Posteriormente se aplica la similitud cinemática, para determinar el caudal de alimentación de la columna a mayor escala, utilizando el concepto de correspondencia de velocidades, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_1}{D_1^2} = \frac{Q_2}{D_2^2} \quad (10)$$

**“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA  
A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**



# **3. METODOLOGÍA**

Martínez Paredes Giancarla Ximena

**Tutor:** PhD. Luis G. López Nina

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Preparación del fertilizante NPK/Biochar

##### 3.1.1 Preparación del fertilizante NPK

Se decidieron utilizar como materias primas para la elaboración del fertilizante NPK:

- Urea granulada, proveniente de la empresa Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos “YPFB”.
- Roca fosfórica, proporcionada por la empresa cochabambina “Jata S.R.L”
- Cloruro de potasio tipo estándar, proporcionado por la empresa Yacimientos de Litio Boliviano “YLB”.

En base a las purezas de las materias primas (Ver Anexo A) se determinó que, para la formulación de 500 g de fertilizante NPK balanceado, el máximo porcentaje que se puede lograr de cada uno de los macronutrientes es de 13,7%, por lo que se realizó el pesaje de las siguientes cantidades:

De urea, la cual tiene una pureza de 46% en N:

$$500 \text{ g NPK} \times \frac{13,7 \text{ g N}}{100 \text{ g NPK}} \times \frac{100 \text{ g urea}}{46 \text{ g N}} = 148,91 \text{ g urea}$$

De roca fosfórica, la cual tiene una pureza de 28,85 % en  $P_2O_5$ :

$$500 \text{ g NPK} \times \frac{13,7 \text{ g } P_2O_5}{100 \text{ g NPK}} \times \frac{100 \text{ g roca fosfórica}}{25 \text{ g } P_2O_5} = 237,44 \text{ g roca fosfórica}$$

De cloruro de potasio (KCl), el cual tiene una pureza de 60% en  $K_2O$ :

$$500 \text{ g NPK} \times \frac{13,7 \text{ g } K_2O}{100 \text{ g NPK}} \times \frac{100 \text{ g KCl}}{60 \text{ g } K_2O} = 114,17 \text{ g KCl}$$

Para facilitar el proceso de mezclado se uniformizó el tamaño de partícula de todas las materias primas a un tamaño de malla menor a 250  $\mu\text{m}$  empleando un mortero. Finalmente, las cantidades pesadas se llevaron a un recipiente donde fueron mezcladas mediante el uso de espátula bajo agitación constante a modo de asegurar una mezcla uniforme.

### 3.1.2 Preparación del biochar

El biochar fue obtenido a partir de residuos de poda proporcionados por la Empresa Municipal de Áreas Verdes, Parques y Forestación “Emaverde”.

Los residuos de poda fueron previamente triturados hasta un tamaño de malla de 2 mm para posteriormente ser colocados en un tubo de borosilicato sellado en ambos extremos con lana de cuarzo, esto con el objetivo de evitar el desbordamiento de la materia prima. Posteriormente, los residuos se sometieron a un proceso de pirólisis en un horno marca ChengYi CHY -1200, a una temperatura de 472 °C por un tiempo de 60 min, sin rampa de calentamiento y a un flujo de 1 l/min de argón en un sistema como se observa en la Figura 3.1.

Las condiciones de pirólisis a las que se trabajaron fueron determinadas preliminarmente como parte del proyecto “Gestión de Residuos de Bioseguridad y Aprovechamiento para la Generación de Productos de Valor Agregado a través de Procesos Químicos”, donde se determinó que a estas condiciones de pirólisis se presentaba una mayor área superficial y mayor capacidad de retención de agua (Lopez et al., 2021).

#### Figura 3.1

*Horno reactor de pirólisis*



### 3.1.3 Preparación de las pastillas de biochar – NPK

Primeramente, se prepararon 100 g de cada una de las formulaciones, pesando las cantidades de NPK y biochar que se indican en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1***Formulaciones de las muestras de fertilizante NPK/Biochar*

	Formulaciones		
	2:1	1:1	1:2
Masa de NPK [g]	66,67	50,00	33,33
Masa de biochar [g]	33,33	50,00	66,67
Masa total [g]	100,00	100,00	100,00

El biochar es un material que carece de plasticidad, lo que dificulta la adhesión de sus partículas entre sí en el proceso de empastillado, por lo que fue necesario el empleo de un material aglutinante. Se decidió emplear almidón de yuca debido a que presenta una buena capacidad de retención de agua y una baja temperatura de gelatinización (65,2 °C) (Hernández-Medina et al., 2008), además de ser un polímero natural renovable, de bajo costo, ampliamente disponible y que es completamente biodegradable sin generar residuos tóxicos (Bumanis et al., 2020).

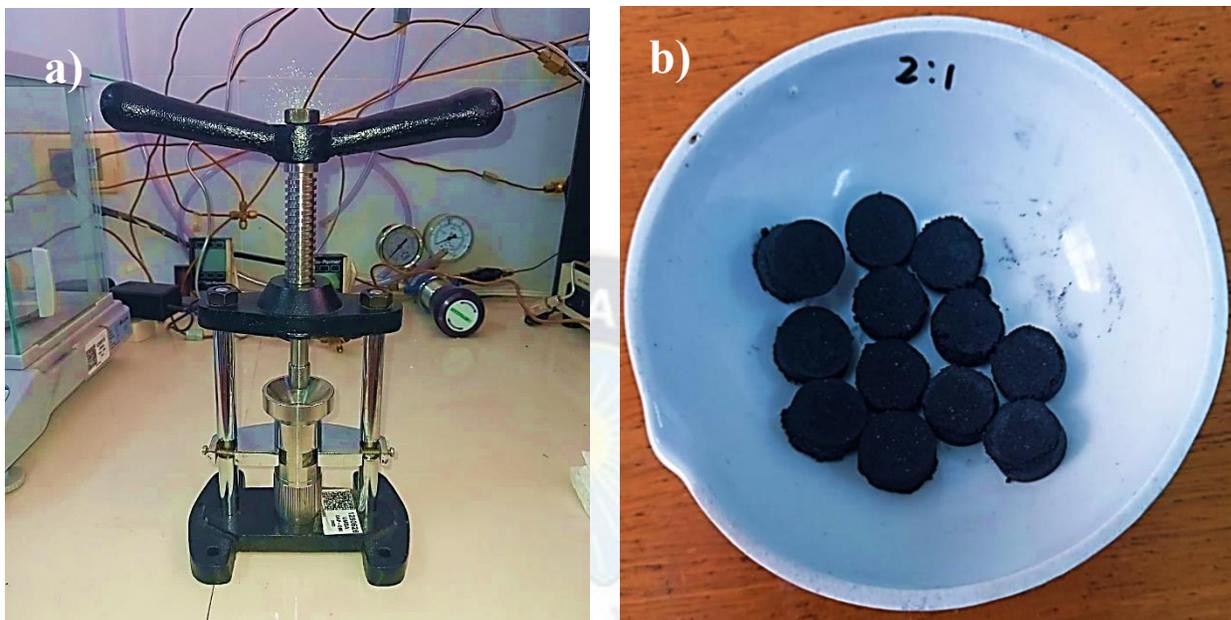
Se empleó 6,5 % en peso de almidón de yuca como aglutinante. La cantidad de agua destilada necesaria para la gelatinización fue determinada preliminarmente en función al contenido de biochar presente en la mezcla, de modo que se logre un adecuado empastillamiento sin la necesidad de emplear mucha presión. Se determinó como proporción óptima 1,2 g de agua/ g de biochar. La gelatinización se llevó a cabo sometiendo la mezcla de almidón con agua destilada a una velocidad de calentamiento de 5 °C/min y agitación constante hasta que alcance los 60 °C.

El almidón gelatinizado se mezcló con las distintas formulaciones indicadas en la Tabla 3.1, para posteriormente ser llevadas a una prensa manual junto a un molde de pastillas de 1 cm de diámetro (Figura 3.2), siendo necesario realizar el pesaje de 1,212 g de mezcla por cada pastilla elaborada.

Se formaron pastillas de 1 cm de diámetro y 0,71 cm de alto los cuales fueron secados en un horno a 70 °C por 24 horas (Figura 3.2), obteniéndose finalmente pastillas de 0,672 g.

**Figura 3.2**

*Prensa manual para la elaboración de pastillas*



*Nota: a) Prensa manual b) Pastillas de fertilizante*

### **3.2 Caracterización**

#### **3.2.1 Área superficial**

La determinación del área superficial se realizó empleando la metodología ASTM D6556-14, la cual se basa en la evaluación de la cantidad de nitrógeno adsorbido por muestras carbonosas a la temperatura del nitrógeno líquido, trabajando a distintas presiones parciales de nitrógeno gaseoso (ASTM International, 2012).

Se empleó un equipo Quantachrome ChemBET con un detector de termoconductividad (TCD) de un cromatógrafo de gases DANI, conectado en línea. La muestra fue pesada y depositada en un portamuestras en forma de U como se observa en la Figura 3.3.

La obtención de la isoterma de adsorción en la región BET se desarrolló mediante el registro del proceso de adsorción y desorción de nitrógeno a distintas presiones relativas que van de 0,10 a 0,35, las cuales fueron fijadas por medio de la mezcla de helio y nitrógeno en concentraciones diferentes, mediante el uso de controladores de flujo másico.

El proceso de adsorción se realizó sumergiendo el portamuestras en nitrógeno líquido de forma que se obtuvo una pérdida en la señal registrada en el TCD a consecuencia de la condensación del nitrógeno sobre las paredes del adsorbente. De esta forma se obtuvo la cantidad adsorbida de nitrógeno por el adsorbente a una determinada presión relativa.

En el proceso de desorción el portamuestras se sumergió en agua a temperatura ambiente, lo que hizo que las moléculas de nitrógeno se desorban, generando un aumento en las señales del TCD, permitiendo la cuantificación de la cantidad de nitrógeno desorbido por el adsorbente a una determinada presión relativa.

Las señales generadas por el TCD fueron tratadas mediante el software OriginPro 2017 para hallar el volumen desorbido de nitrógeno por masa de muestra y de esta forma realizar el correspondiente tratamiento matemático.

La cuantificación del área superficial se realizó trabajando en la región lineal de la isoterma (adsorción en monocapa). El procedimiento de linealización de datos se realizó en función a la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{V(P_o - P)} = \frac{(c - 1)}{cV_m} \cdot \frac{P}{P_o} + \frac{1}{cV_m} \quad (11)$$

Donde: V es el volumen de nitrógeno adsorbido por gramo de muestra (ml/g), P es la presión manométrica (kPa), P<sub>o</sub> es la presión de saturación del vapor de nitrógeno (kPa), V<sub>m</sub> es el volumen adsorbido a cobertura monocapa y c es la constante BET.

La ecuación (11) puede ser representada de forma lineal de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Y = A + BX \quad (12)$$

En donde se grafica  $\frac{P}{P_o}$  en el eje "X" y  $\frac{P}{V(P_o - P)}$  en el eje "Y" trabajando con valores en el eje "X" que van desde 0,10 a 0,35 (región lineal BET).

Finalmente, el área superficial específica se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{Area superficial} \left[ \frac{m^2}{g} \right] = 4,35 * V_m \quad (13)$$

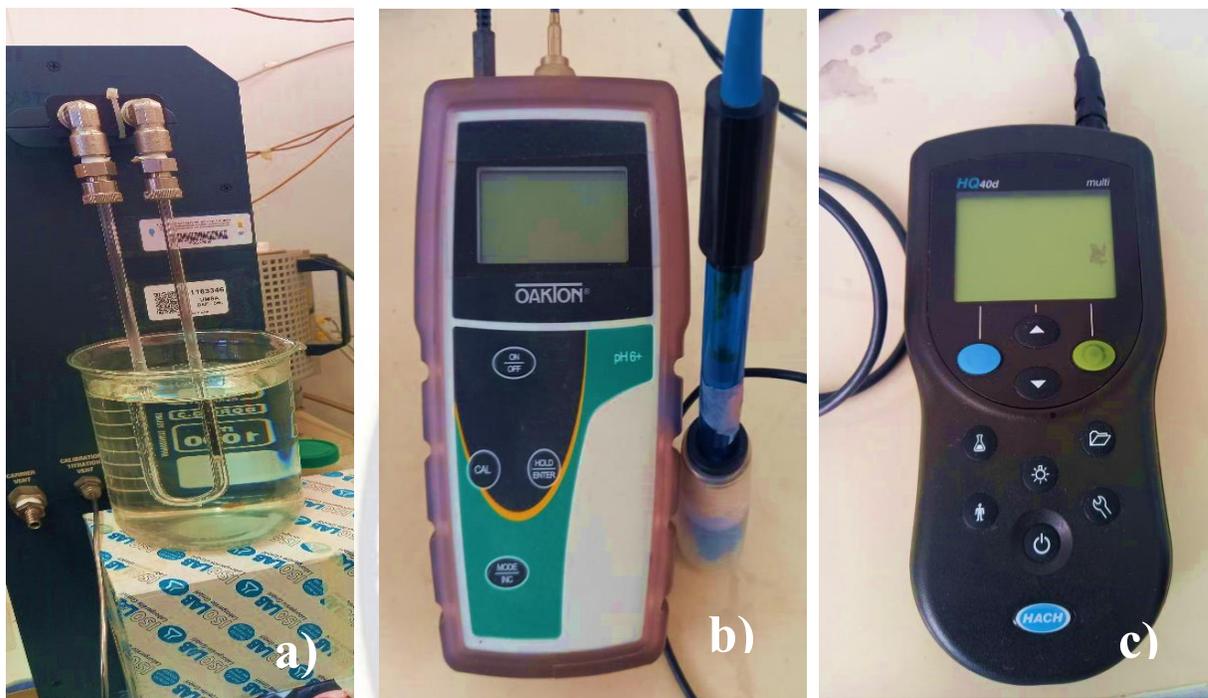
Donde:

$$V_m = \frac{1}{A + B} \quad (14)$$

El valor de 4,35 se refiere al área ocupada por 1 cm<sup>3</sup> de nitrógeno.

### Figura 3.3

#### Caracterización de las muestras



Nota: Determinación de: a) Área superficial b) pH c) Conductividad eléctrica

#### 3.2.2 Determinación de pH

La determinación de pH se realizó siguiendo la metodología propuesta por (Singh et al., 2017), para lo cual la muestra se puso en contacto con agua desionizada en una relación másica 1:2 en un vaso de precipitados bajo agitación constante durante 1 hora. Posteriormente las muestras se dejaron reposando por 30 min para después realizar la lectura de pH empleando un pHmetro portátil marca Oakton (Figura 3.3). Se siguió este procedimiento para cada una de las mezclas de NPK/biochar.

#### 3.2.3 Determinación de la conductividad eléctrica

La determinación de la conductividad eléctrica se realizó siguiendo la metodología propuesta por (Singh et al., 2017), para lo cual la muestra se puso en contacto con agua desionizada en una relación másica 1:2 en un vaso de precipitados bajo agitación constante durante 1 hora. Posteriormente las muestras se dejaron reposando por 30 min para después realizar la lectura

de la conductividad eléctrica empleando un multímetro portátil HQ40D marca Hach (Figura 3.3). Se siguió este procedimiento para cada una de las mezclas de NPK/biochar.

### **3.2.4 Absorción de agua**

La absorción de agua se refiere a la capacidad del material de absorber agua cuando este se encuentra inmerso en esta. La capacidad de absorción de agua se define como la relación entre el peso de agua absorbida por el material en el estado saturado sobre el peso del material seco (Li & Ren, 2011).

Para su determinación se siguió la metodología propuesta por (Gwenzi et al., 2018) en la cual se pesó 1 g de muestra en 20 ml de agua destilada y se dejó reposando por 3 horas. Posteriormente, se filtró la muestra empleando papel filtro Whatman N 40 y se registró el peso de la muestra húmeda. La capacidad de absorción de agua se calculó con la ecuación:

$$WA = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (15)$$

Donde  $M_1$  es el peso de la muestra seca y  $M_2$  es el peso de la muestra húmeda. Ambos expresados en gramos.

### **3.2.5 Retención de agua**

La retención de agua es esencial para la productividad de los cultivos, debido a que determina la absorción y transporte de agua en el suelo, lo que puede afectar el rendimiento de los cultivos (Razzaghi et al., 2020).

Para estudiar la retención de agua del suelo que contiene las diferentes mezclas de NPK/biochar se empleó la metodología propuesta por (Lateef et al., 2019).

Se alistaron 5 vasos de precipitados de 250 ml, en cada uno de los vasos se añadieron 50 g de suelo seco tamizado proveniente del municipio de Chejepampa, provincia Omasuyos del departamento de La Paz, debido a que se trata de suelos con fertilidad moderada a baja, además de que se pretende trabajar con estos suelos en una etapa posterior del proyecto.

Se colocaron 2 g de las diferentes mezclas de fertilizante NPK/Biochar en distintos vasos, excepto en el primer vaso que se consideró como blanco o control. Posteriormente a cada vaso se le agregaron 30 ml de agua destilada y se registró su peso inicial ( $W_0$ ). Todos los vasos se dejaron reposar bajo las mismas condiciones ambientales y fueron pesados cada cierto tiempo

durante un mes. La retención de agua (% WR) del suelo se determinó mediante la ecuación (Jamnongkan & Kaewpirom, 2010):

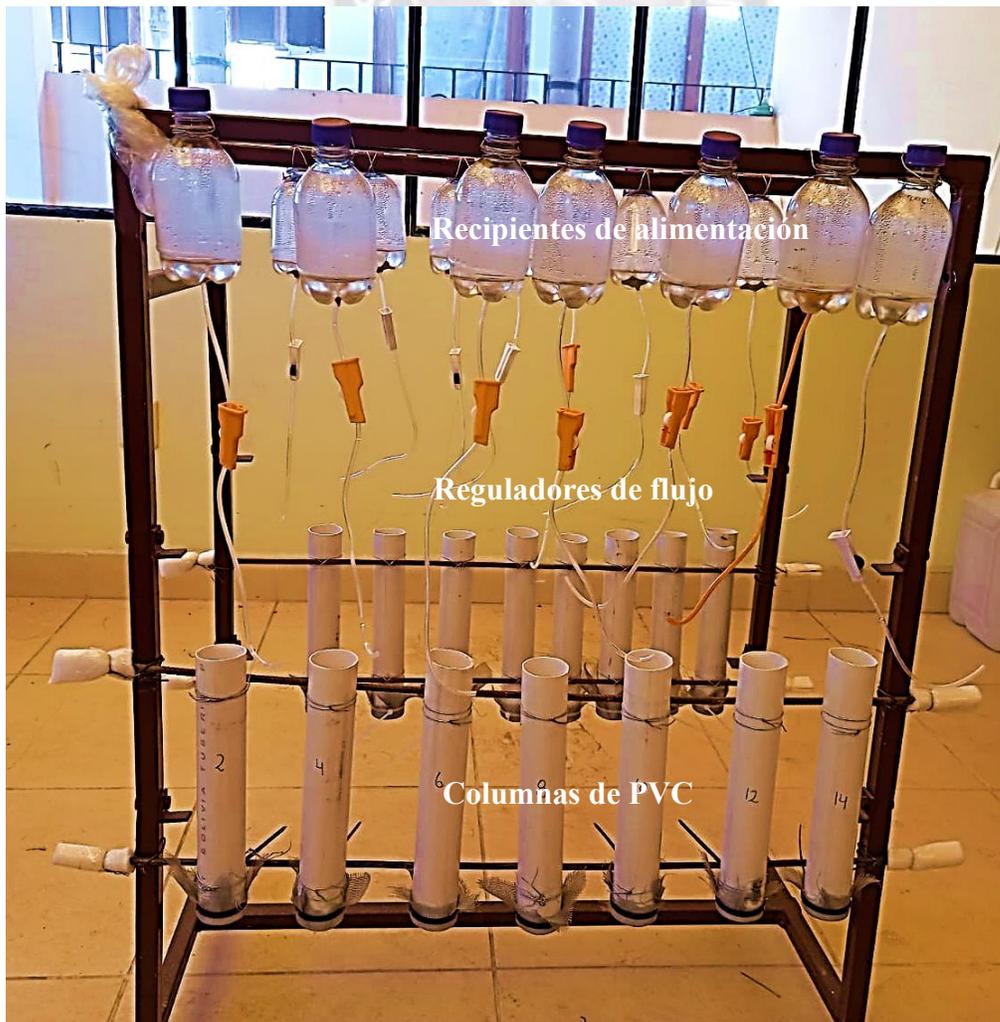
$$\% WR = \frac{W_t - W}{W_0 - W} \times 100\% \quad (16)$$

Donde:  $W$  es el peso de la muestra antes de que se añada agua,  $W_0$  es el peso inicial de la muestra después de añadir agua en el día 0 y  $W_t$  es el peso de la muestra el día “t”.

### 3.3 Columnas de lixiviación

Los tratamientos consistieron en el empleo del biochar, fertilizante NPK y las diferentes mezclas de fertilizante NPK/Biochar con el fin de verificar el funcionamiento del fertilizante de liberación lenta y encontrar la relación óptima. Los experimentos de lixiviación de nutrientes siguieron la metodología propuesta por (Chen et al., 2018), para lo cual se construyó el sistema mostrado en la Figura 3.4.

**Figura 3.4**  
*Sistema de columnas de lixiviación*



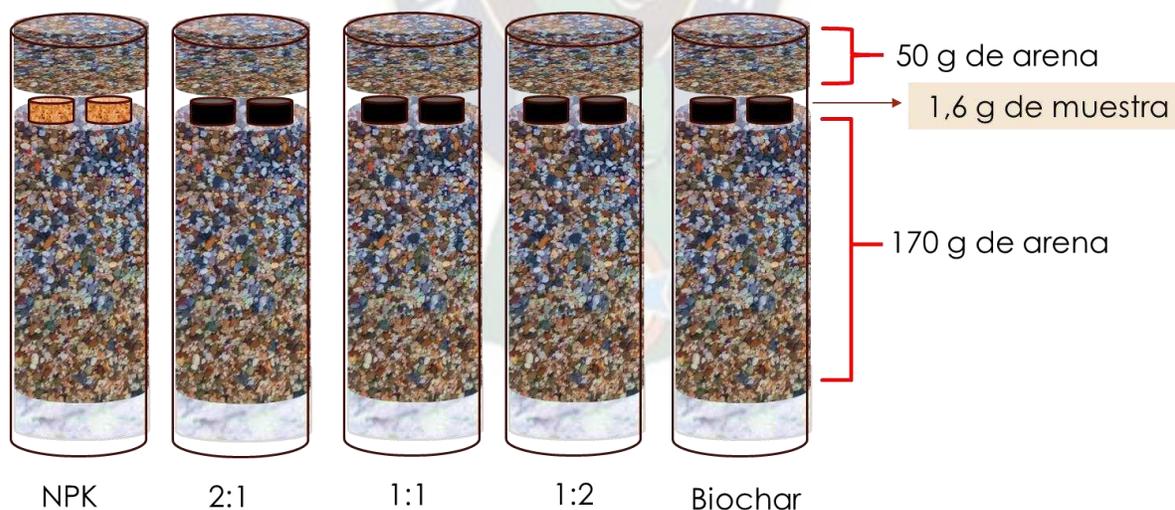
El sistema consta de 15 de columnas de PVC de 1,5 pulgadas de diámetro y 25 cm de alto, las cuales fueron selladas en el fondo con una malla #100 seguido de una capa de algodón. En la parte superior presenta recipientes de alimentación de agua con una capacidad de 300 ml conectados a reguladores de flujo.

Se adicionó a cada columna  $170,029 \pm 0,007$  g de arena previamente lavada, secada y tamizada a un tamaño de malla de 2 mm. Posteriormente, se cargaron  $1,599 \pm 0,001$  g de las diferentes mezclas de fertilizante NPK/biochar, de acuerdo a la Figura 3.5 y finalmente se añadieron  $50,023 \pm 0,007$  g de arena.

Las columnas de suelo se humedecieron diariamente con 100 ml de agua de grifo a una velocidad de flujo de 10 ml/min. Se recolectaron muestras de lixiviados, los días 1, 5, 8, 12, 15, 19 y 22, en frascos de polietileno para posteriormente realizar las lecturas de la concentración de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3 - \text{N}$ ,  $\text{PO}_4 - \text{P}$  y  $\text{K}^+$ . Cada una de las pruebas se realizó por triplicado.

**Figura 3.5**

*Esquema de columnas para las diferentes formulaciones*



### 3.3.1 *Ajuste a modelo de lixiviación*

Los datos de la concentración de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3 - \text{N}$ ,  $\text{PO}_4 - \text{P}$  y  $\text{K}^+$  presente en las aguas lixiviadas se convirtieron en datos de concentración acumulada los cuales fueron ajustados usando la función de curva asintótica no lineal propuesta por Michaelis Menten.

El modelo de Michaelis Menten es utilizado principalmente para caracterizar la tasa enzimática a diferentes concentraciones de sustrato, sin embargo, en trabajos recientes se observó que este modelo puede ser utilizado para predecir las cantidades acumuladas de los iones liberados en función de los periodos de lixiviación, por lo que la ecuación de Michaelis Menten puede ser representada de la siguiente forma (Shin & Park, 2018):

$$Y = \frac{A_{max} \times t}{t_{1/2(max)} + t} \quad (17)$$

Donde Y corresponde a la concentración acumulada (mg/l);  $A_{max}$  es la concentración acumulada máxima (mg/l);  $t_{1/2(max)}$  es el tiempo requerido para lograr la mitad de la concentración máxima acumulada y  $t$  corresponde al tiempo de lixiviación (días).

Los datos experimentales de lixiviación de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3 - \text{N}$ ,  $\text{PO}_4 - \text{P}$  y  $\text{K}^+$  se ajustaron a la Ecuación (17) empleando el software OriginPro 2017.

### 3.3.2 *Análisis estadístico*

El análisis estadístico de la lixiviación de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ ,  $\text{PO}_4 - \text{P}$ ,  $\text{NO}_3 - \text{N}$  y  $\text{K}^+$  se realizó empleando el análisis de varianza de una vía (one way ANOVA) con 4 niveles.

Posteriormente se aplicaron las pruebas de comparaciones múltiples de Tukey (donde se comparan las medias individuales entre tratamientos) y Dunnett (donde se compara la media del grupo control con las medias de los grupos experimentales), ambas con un 5 % de significancia, empleando el software Minitab, de acuerdo a los indicado en la Tabla 3.2.

### 3.4 **Determinación de nitratos**

Se empleó la metodología 4500 -  $\text{NO}_3 - \text{B}$  la cual se aplica para aguas con bajo contenido en materia orgánica. Se realizaron lecturas de absorbancia empleando un espectrofotómetro UV-Visible, el cual trabaja a una longitud de onda de 220 nm y 275 nm, esto con el objetivo de disminuir la interferencia de la materia orgánica disuelta (American Public Health Association, 1992).

Para la construcción de la curva de calibración se prepararon 100 ml de una solución estándar de 500 ppm de NO<sub>3</sub>-N a partir de KNO<sub>3</sub> al 99,5 % de pureza. Posteriormente, mediante dilución, se prepararon soluciones estándar de 1,3,5 y 7 ppm de NO<sub>3</sub>-N.

Las muestras, previamente a ser analizadas, fueron acidificadas con HCl 1 N para prevenir la interferencia de los OH<sup>-</sup> y CO<sub>3</sub><sup>-2</sup> en una proporción volumétrica de HCl/muestra de 1:50.

Las lecturas de absorbancia se corrigieron de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Abs (corregida) = Abs (220 nm) - 2 \times Abs(275nm) \quad (18)$$

**Tabla 3.2**

*Diseño experimental – Pruebas de lixiviación de nutrientes*

<b>Variable independiente</b>	Relación NPK/Biochar (% másico)
<b>Variables respuesta</b>	$t_{1/2(max)}$ de NH <sub>4</sub> – N
	$t_{1/2(max)}$ de NO <sub>3</sub> – N
	$t_{1/2(max)}$ de PO <sub>4</sub> - P
	$t_{1/2(max)}$ de K <sup>+</sup>
<b>Niveles de dosificación</b>	2:1
	1:1
	1:2
	1:0
<b># Experimentos totales</b>	12
<b># Réplicas</b>	3 para la relación 2:1
	3 para la relación 1:1
	3 para la relación 1:2
	3 para la relación 0:1 (control)
<b>Nivel de confianza</b>	95%
<b>Hipótesis nula</b>	No existe diferencia entre tratamientos
<b>Hipótesis alterna</b>	Al menos uno de los tratamientos es diferente

### 3.5 Determinación de amonio

Se empleó la metodología del electrodo selectivo de amonio, la cual se basa en el uso de un electrodo compuesto por una membrana sensora que contiene una solución de relleno interna en contacto con una membrana organofílica gelificada que contiene un intercambiador de iones selectivo de amonio.

Cuando la membrana del electrodo está en contacto con una solución que contiene el ion amonio, se desarrolla en la membrana un voltaje proporcional al nivel de amonio en la solución. La tensión se desarrolla en relación con un electrodo de referencia interno Ag/AgCl (Cole Palmer Instrument Company, n.d.).

El nivel de iones amonio, correspondiente a la medida de potencial, esta descrita bajo la ecuación de Nerst:

$$E = E_o + S \times \log X \quad (19)$$

Donde E es el potencial medido del electrodo,  $E_o$  es el potencial de referencia, S es la pendiente (aproximadamente igual a 56 mV) y X es la actividad, que representa la concentración efectiva de iones en la solución.

La actividad está relacionada con la concentración de iones libres " $C_f$ " y por el coeficiente de actividad " $\gamma$ " de acuerdo a la expresión:

$$X = \gamma \times C_f \quad (20)$$

Para la construcción de la curva de calibración se prepararon 100 ml de una solución estándar de 1000 ppm de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  a partir de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  al 99,5 % de pureza. Posteriormente, mediante dilución, se prepararon soluciones estándar de 10, 50 y 100 ppm de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ .

Las lecturas se realizan de forma directa, sumergiendo el electrodo en la solución a analizar, bajo agitación constante empleando un agitador magnético, hasta que las lecturas se estabilicen para posteriormente registrar el potencial "mV".

### **3.6 Determinación de fosfato**

Se empleó la metodología 4500-P – C del ácido vanadomolibdo fosfórico, la cual indica que, en una solución en presencia de fosfato y en condiciones ácidas, el molibdato de amonio reacciona para formar el ácido molibdofosfórico el que a su vez reacciona con el vanadio formando el ácido vanadomolibdofosfórico de color amarillo. La intensidad del color amarillo es proporcional a la concentración de fosfato (APHA, 1992).

Para la construcción de la curva de calibración se prepararon 100 ml de una solución estándar de 50 ppm de  $\text{PO}_4\text{-P}$  a partir de  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  al 99,5 % de pureza. Posteriormente, mediante dilución, se prepararon soluciones estándar de 1,5, 10 y 15 ppm de  $\text{PO}_4\text{-P}$ .

Las muestras se prepararon empleando un matraz aforado de 10 ml al cual se añadieron 7 ml de muestra, 2 ml de reactivo vanado – molibdato (preparado a partir de molibdato de amonio, metavanadato de amonio y ácido clorhídrico) y se aforó con agua destilada. Las muestras se dejaron reposando por 10 min antes de realizar la lectura de absorbancia a una longitud de onda de 470 nm empleando un espectrofotómetro UV- Visible.

### **3.7 Determinación de potasio**

Para la determinación de potasio se empleó el método 3110 B de espectrometría de absorción atómica de llama en la cual la muestra se atrae hacia una llama la cual convierte las muestras en átomos libres en estado fundamental que pueden excitarse hasta el primer nivel de energía. Un haz de luz, que trabaja a una longitud de onda específica, se dirige a través de la llama, hacia un monocromador y hacia un detector que mide la cantidad de luz absorbida por el potasio atomizado en la llama.

La cantidad de energía en la longitud de onda característica absorbida en la llama es proporcional a la concentración de potasio en la muestra en un rango de concentración limitado (APHA, 1992).

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Química Ambiental e Hidroquímica del Instituto de Investigaciones Químicas de la Facultad de Ciencias Puras de la Universidad Mayor de San Andrés.

“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA  
A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Martínez Paredes Giancarla Ximena

**Tutor:** PhD. Luis G. López Nina

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

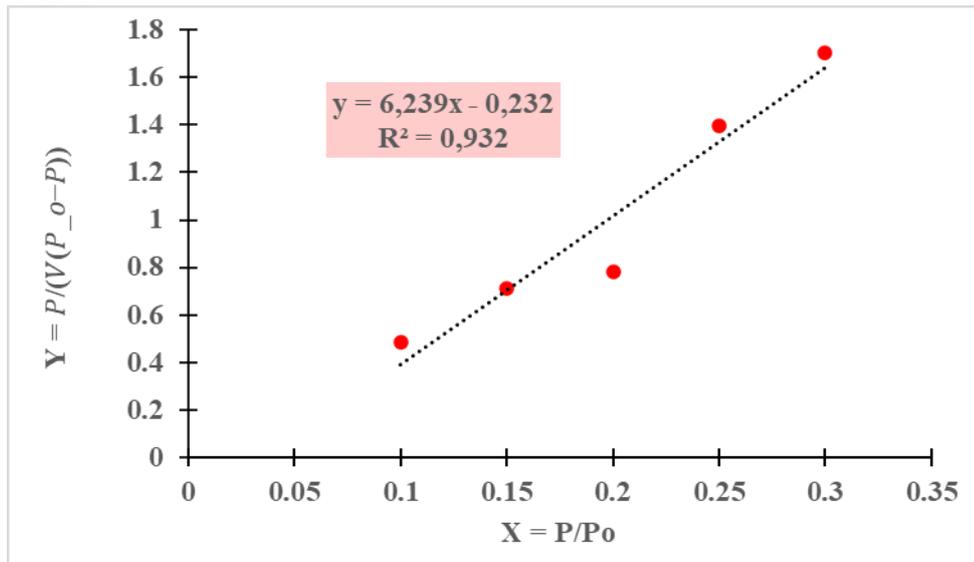
### 4.1 Caracterización del material

#### 4.1.1 Área superficial

Seguindo la norma ASTM D6556 – 14 para la determinación del área superficial por adsorción de nitrógeno se obtuvieron las Figuras 4.1 a 4.5 que corresponden a las gráficas BET de las diferentes mezclas de fertilizante NPK/Biochar.

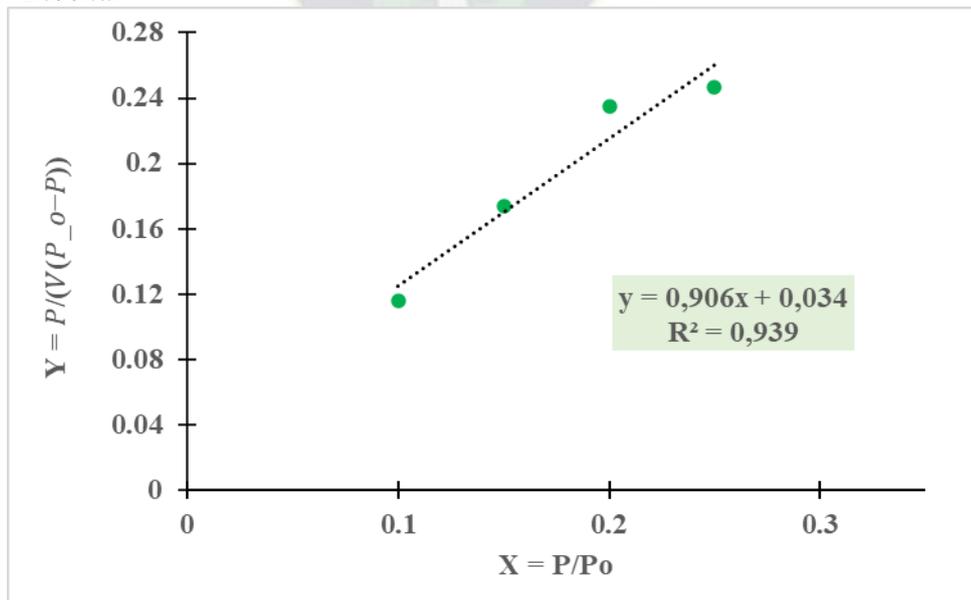
**Figura 4.1**

*Recta B.E.T – NPK*

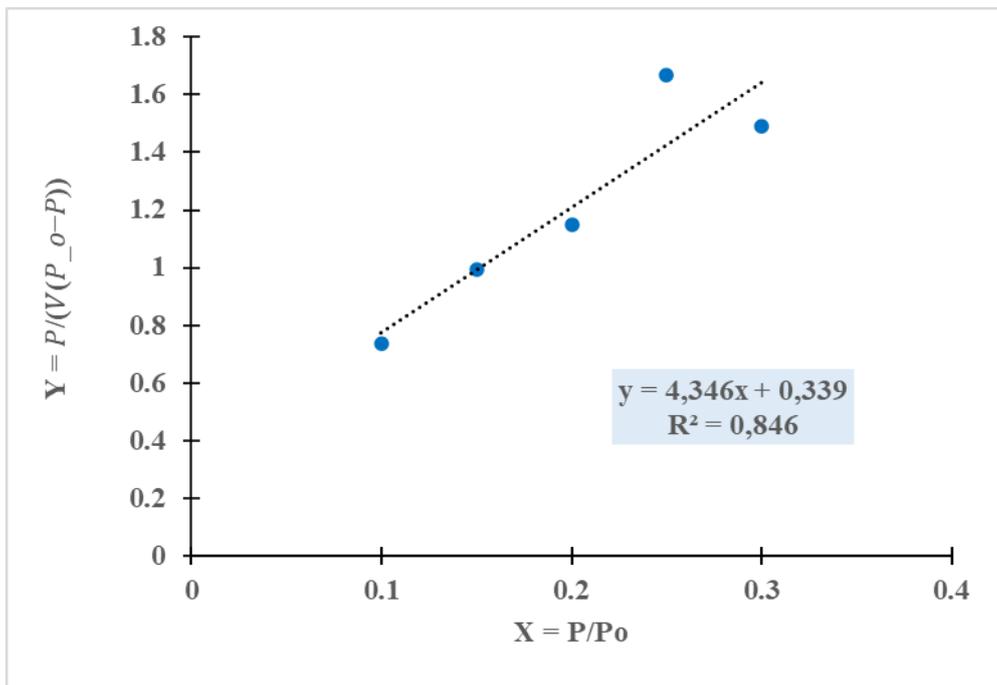


**Figura 4.2**

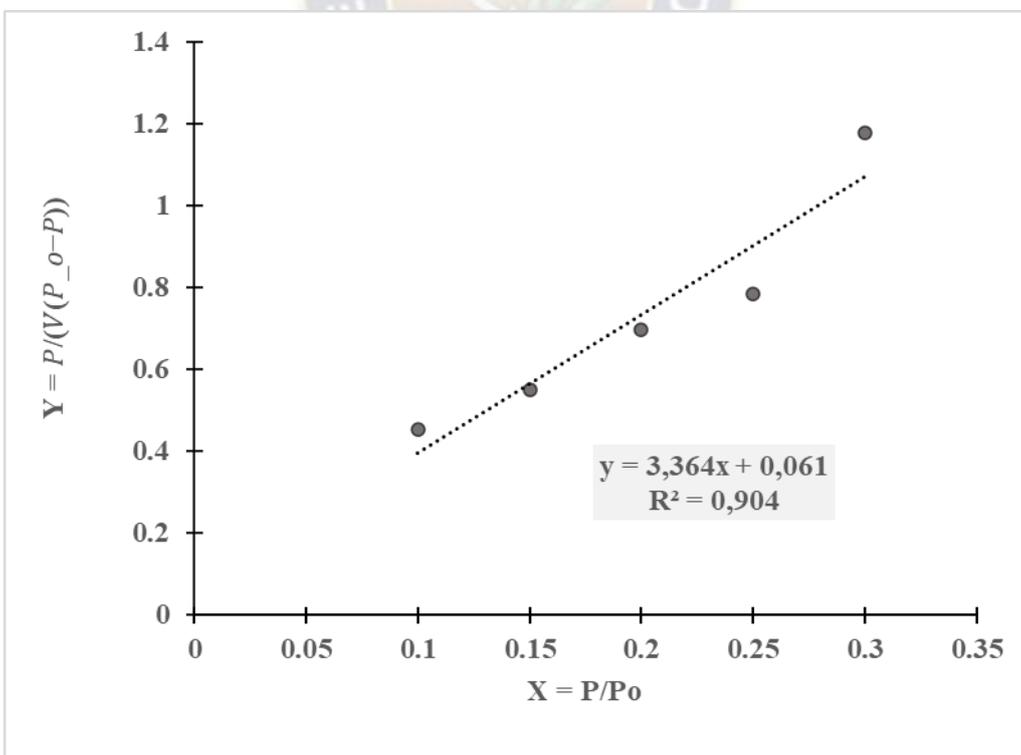
*Recta B.E.T – Biochar*



**Figura 4.3**  
*Recta B.E.T – NPK/Biochar 2:1*

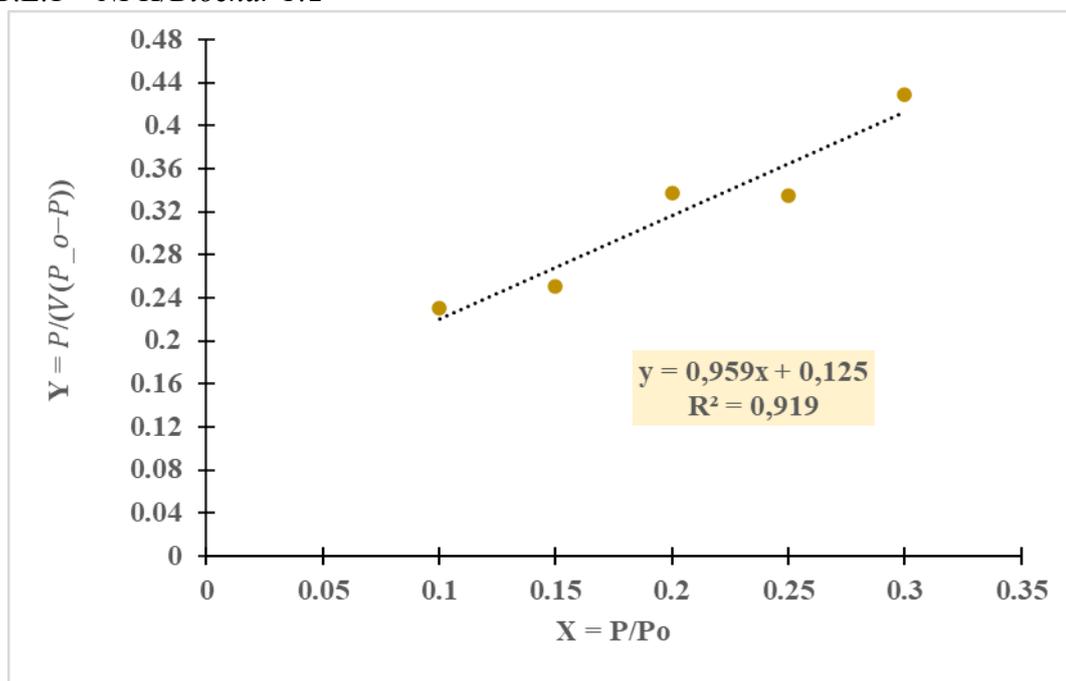


**Figura 4.4**  
*Recta B.E.T – NPK/Biochar 1:1*



**Figura 4.5**

*Recta B.E.T – NPK/Biochar 1:2*



De acuerdo a las Ecuaciones (11) y (12) se determinaron las áreas superficiales las muestras tal y como se observa en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1**

*Determinación del área superficial*

Muestra	A	B	R <sup>2</sup>	V <sub>m</sub>	Área superficial [m <sup>2</sup> /g]
NPK	6,239	-0,232	0,932	0,166	0,724 ± 0,016
Biochar	0,906	0,034	0,939	1,064	4,628 ± 0,075
2:1	4,346	0,339	0,846	0,213	0,929 ± 0,100
1:1	3,364	0,061	0,904	0,292	1,270 ± 0,080
1:2	0,959	0,125	0,919	0,923	4,014 ± 0,011

Se observa que el área superficial aumenta a medida que aumenta el contenido de biochar en las mezclas, pasando de un área superficial de 0,724 m<sup>2</sup>/g cuando la muestra es solo NPK a 4,014 m<sup>2</sup>/g en la muestra de fertilizante NPK/biochar 1:2.

El aumento en el área superficial que proporciona la adición de biochar al fertilizante NPK puede dar un efecto positivo al suelo brindando una mayor capacidad de retención de agua y una mejor retención y distribución de nutrientes (Sumbogo Murti et al., 2020).

#### **4.1.2 Determinación de pH**

Los resultados de pH para cada una de las muestras se observan en la Tabla 4.2.

Existe una leve disminución de pH a medida que se aumenta la cantidad de NPK, pasando de un valor de 9,980 cuando la muestra es solo biochar a 9,555 en la muestra de fertilizante NPK/biochar 2:1. El biochar por lo general presenta un pH básico debido a que, durante el tratamiento térmico, gran parte de los grupos funcionales ácidos se remueven y las sales de elementos alcalinos y alcalinotérreos se enriquecen, dándole un carácter básico (Singh et al., 2017), el cual puede ser aprovechado para neutralizar el pH de suelos ácidos, como los encontrados en la región Subandina, llanura Beniana, Altoandina y Vertiente Oriental.

A mayor acidez ocurre la disminución de la fertilidad del suelo debido a la lixiviación de cationes básicos como el Ca, Mg, K, P y Mo, restringiendo el crecimiento de las plantas y la biota del suelo (Geng et al., 2022).

#### **4.1.3 Determinación de la conductividad eléctrica (CE)**

Los valores de conductividad eléctrica determinados para cada una de las muestras se aprecian en la Tabla 4.2.

El biochar presenta una conductividad eléctrica baja, igual a 0,576 [mS/cm] en comparación del NPK que tiene un valor de 17,797 [mS/cm]. A medida que aumenta el contenido de NPK aumenta también la conductividad eléctrica lo que puede significar la incorporación de metales o sales metálicas a la estructura del fertilizante NPK/biochar. La baja conductividad eléctrica del biochar se debe al bajo contenido en cenizas (< 1 % en peso) que presentan las biomásas leñosas (Rehrah et al., 2014).

Las diferentes mezclas de fertilizante NPK/biochar pueden ser empleadas en suelos poco salinos como los encontrados en el Altiplano norte, donde los suelos presentan una conductividad eléctrica de 0,023 a 0,196 mS/cm (Limachi, 2018). Por otra parte, no es recomendable su aplicación en suelos de la región del Altiplano sur, debido a que se han encontrado suelos con una conductividad eléctrica promedio de 5,02 mS/cm, variando la concentración de sales desde 1,51 hasta 11,72 mS/cm (Mita Quisbert & Hervé, 2021).

#### 4.1.4 Determinación de la absorción de agua (WA)

Los resultados de la absorción de agua (WA) de cada una de las muestras se observan en la Tabla 4.2.

La WA aumenta a medida que aumenta el contenido de biochar, pasando de un valor de 0,106 en el fertilizante NPK a 2,202 en la muestra de NPK/Biochar 1:2.

En general el biochar está caracterizado por tener una mayor estructura porosa que puede absorber físicamente el agua para luego liberarla al suelo o a las plantas, especialmente en áreas áridas o con poca precipitación (Lateef et al., 2019).

**Tabla 4.2**

*Propiedades físico-químicas de las mezclas de fertilizante NPK/Biochar*

	pH	CE [mS/cm]	WA [g agua/ g muestra]	Área superficial [m <sup>2</sup> /g]
Biochar	9,980	0,576	3,067	4,628 ± 0,075
NPK	8,353	17,797	0,106	0,724 ± 0,016
2:1	9,555	11,523	1,559	0,929 ± 0,100
1:1	9,687	8,170	1,712	1,270 ± 0,080
1:2	9,767	6,360	2,202	4,014 ± 0,011

#### 4.1.5 Retención de agua

La Figura 4.6 muestra la retención de agua de las diferentes mezclas de NPK/Biochar y del suelo sin ningún tratamiento (blanco), tomada durante un tiempo de 31 días.

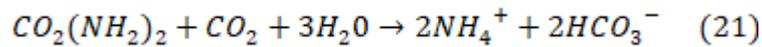
La retención de agua disminuye con el tiempo. Al tratarse de un suelo arcilloso la pérdida de agua es gradual, debido a que las partículas de arcilla son más pequeñas, lo que le da mayor superficie y, por lo tanto, más capacidad para retener el agua.

Las muestras que tienen biochar tienen una mayor retención de agua durante el lapso experimental.

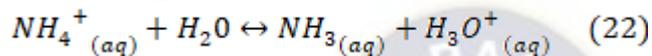
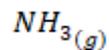
Después de 31 días, la retención de agua de las muestras de NPK/Biochar 1:2, 1:1 y 2:1 y NPK sin biochar fueron de 36,56 %, 36,18 %, 34,87 %, 28,53% respectivamente, mientras que del suelo sin tratamiento fue de 32,88 %.

Se observa que a mayor contenido de biochar existe mayor retención de agua, lo que puede atribuirse a la elevada porosidad del biochar, la presencia de dominios hidrófilos y su área superficial específica (Razzaghi et al., 2020).

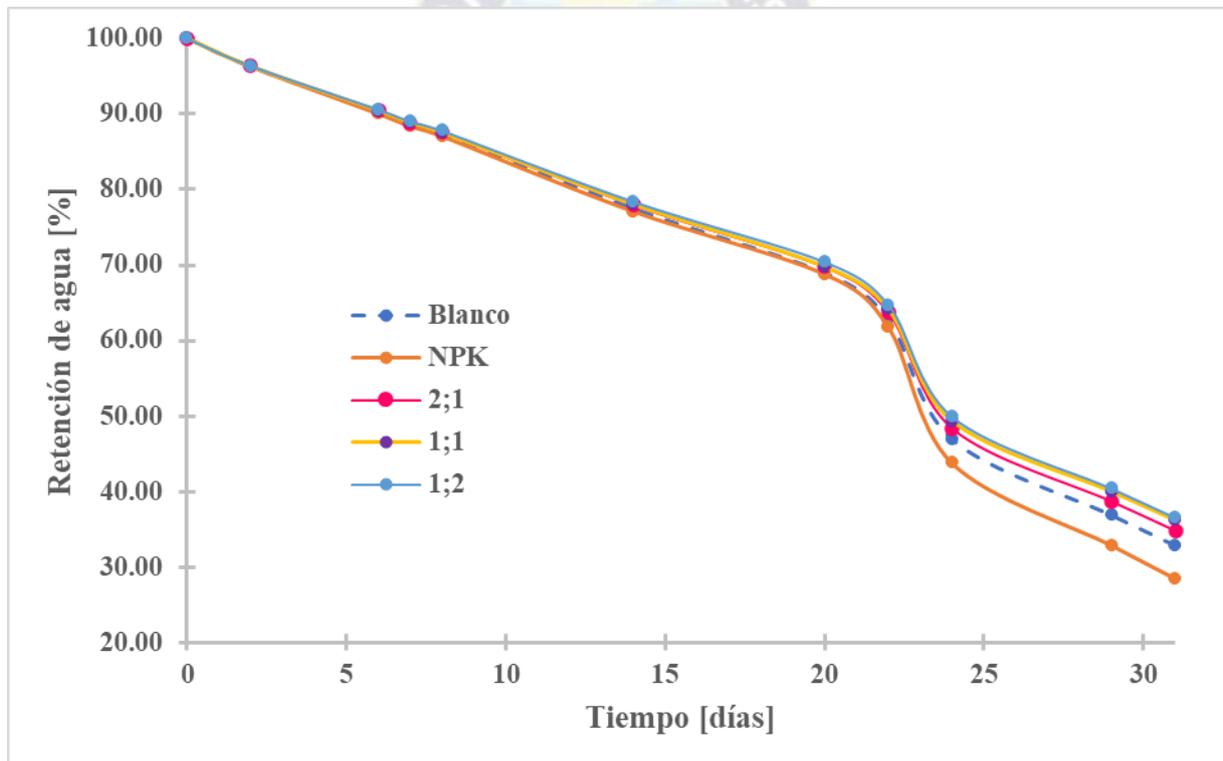
Por otra parte, se aprecia que la pérdida de agua es mayor en la muestra que tiene NPK a comparación del suelo sin tratamiento, lo cual puede deberse a la rápida volatilización del  $\text{NH}_4^+$  derivado de la urea, de acuerdo a las siguientes reacciones (Kirk & Nye, 1991):



Volatilización



**Figura 4.6**  
Retención de agua



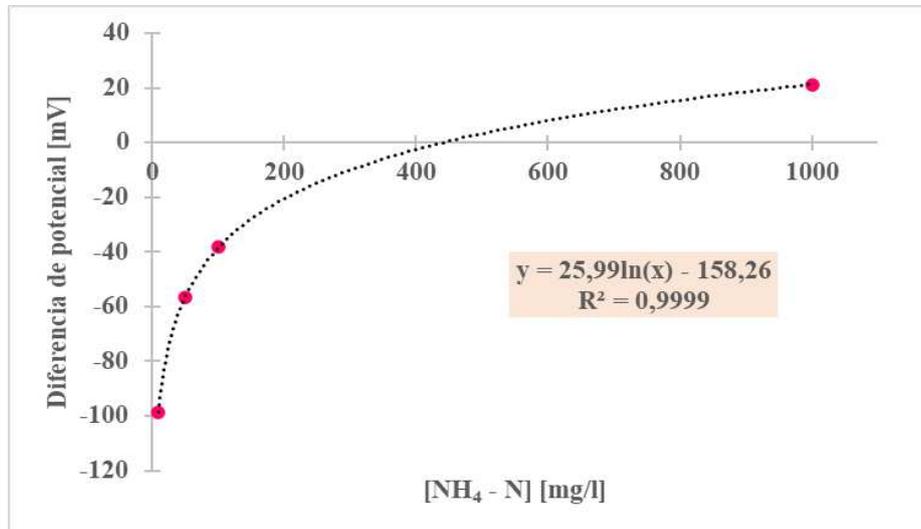
## 4.2 Determinación de iones

### 4.2.1 Elaboración de la curva de calibración $\text{NH}_4\text{-N}$

Se presenta en la Figura 4.7 la gráfica de calibración obtenida para la determinación de la concentración de  $\text{NH}_4\text{-N}$  mediante el uso del electrodo selectivo de iones.

**Figura 4.7**

*Diferencia de potencial vs Concentración de NH<sub>4</sub>-N*



La gráfica obtenida es de carácter logarítmico con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,999, por lo tanto, la concentración de nitrógeno amoniacal “[NH<sub>4</sub>-N]” en función al potencial “P” esta expresada de acuerdo a la ecuación:

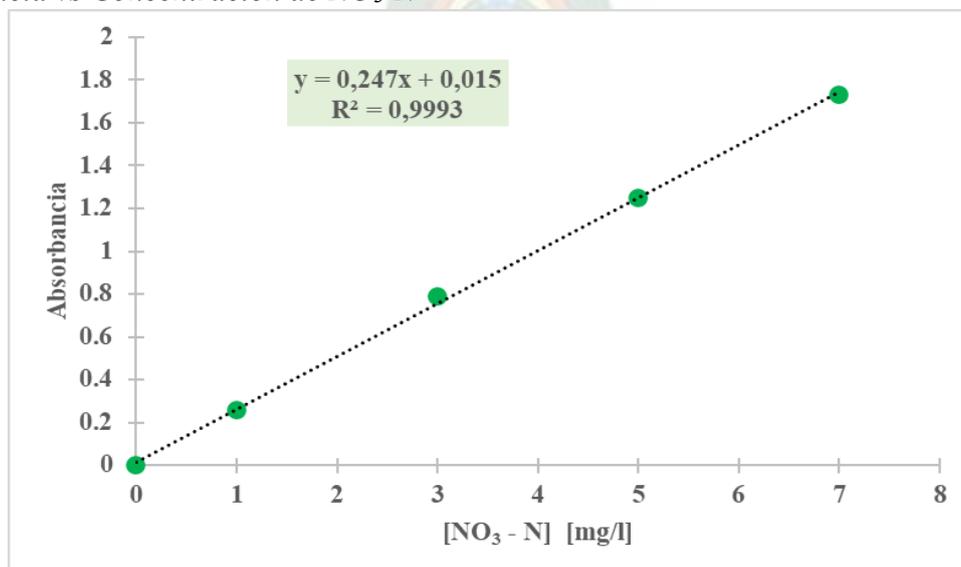
$$[NH_4 - N] = e^{0,038 \times P + 6,089} \quad (23)$$

#### 4.2.2 Elaboración de la curva de calibración NO<sub>3</sub>-N

Se presenta en la Figura 4.8 la recta de calibración obtenida para la determinación de la concentración de NO<sub>3</sub>-N mediante la metodología 4500-NO<sub>3</sub> – B.

**Figura 4.8**

*Absorbancia vs Concentración de NO<sub>3</sub>-N*



La recta obtenida tiene una tendencia lineal con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,9993, por lo tanto, la concentración de nitrógeno nitrato “[NO<sub>3</sub>-N]” en función a la absorbancia “Abs” esta expresada de acuerdo a la ecuación:

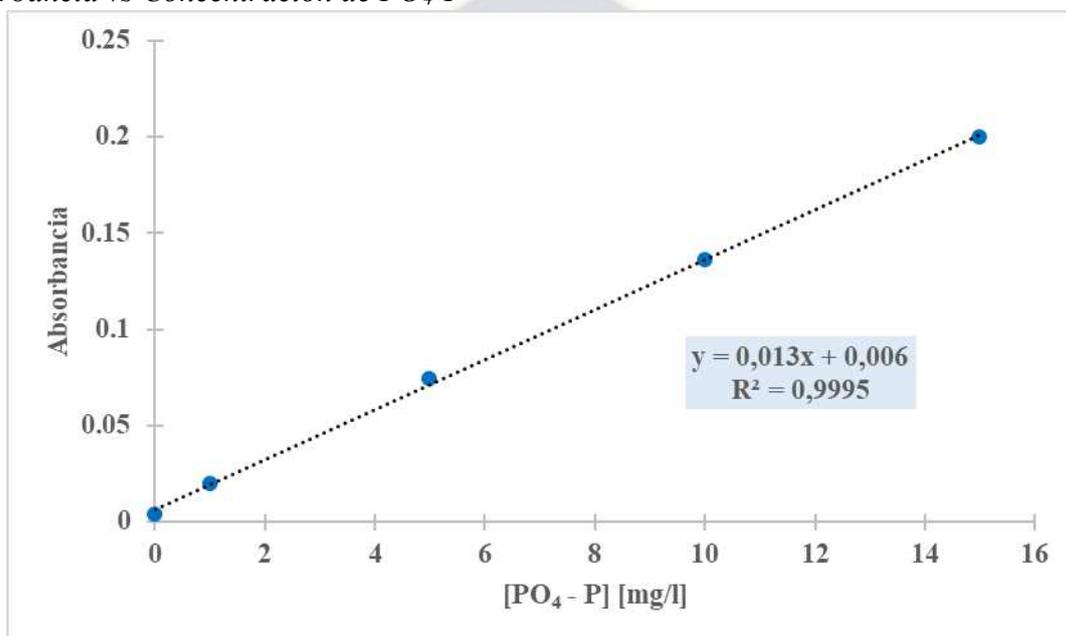
$$[NO_3 - N] = 4,052 \times Abs - 0,062 \quad (24)$$

#### 4.2.3 Elaboración de la curva de calibración PO<sub>4</sub>-P

Se presenta en la Figura 4.9 la recta de calibración obtenida para la determinación de la concentración de PO<sub>4</sub>-P mediante la metodología 4500-P – C.

**Figura 4.9**

*Absorbancia vs Concentración de PO<sub>4</sub>-P*



La recta obtenida tiene una tendencia lineal con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,9995. Por lo tanto, la concentración de fosfato fósforo “[PO<sub>4</sub>-P]” en función a la absorbancia “Abs” esta expresada de acuerdo a la ecuación:

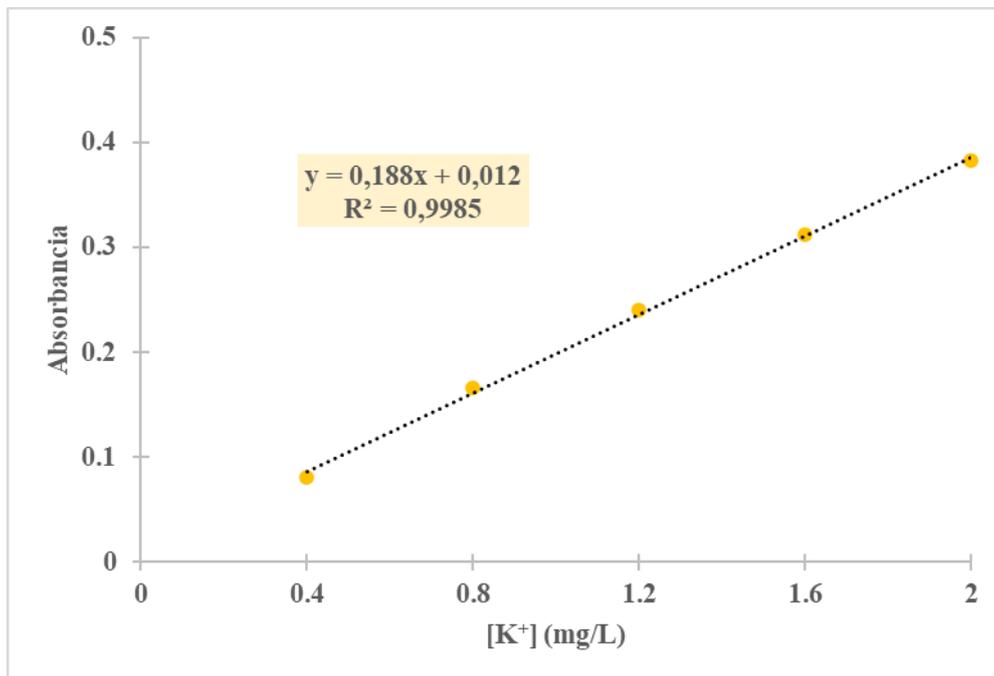
$$[PO_4 - P] = 76,923 \times Abs - 0,492 \quad (25)$$

#### 4.2.4 Elaboración de la curva de calibración K<sup>+</sup>

Se presenta en la Figura 4.10 la recta de calibración de la concentración de K<sup>+</sup> respecto a la absorbancia determinada mediante espectroscopia de absorción atómica de llama.

**Figura 4.10**

*Absorbancia vs Concentración de  $K^+$*



La recta obtenida tiene una tendencia lineal con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,9985, por lo tanto, la concentración de potasio “[ $K^+$ ]” en función a la absorbancia “Abs” esta expresada de acuerdo a la ecuación:

$$[K^+] = 5,333 \times Abs - 0,062 \quad (26)$$

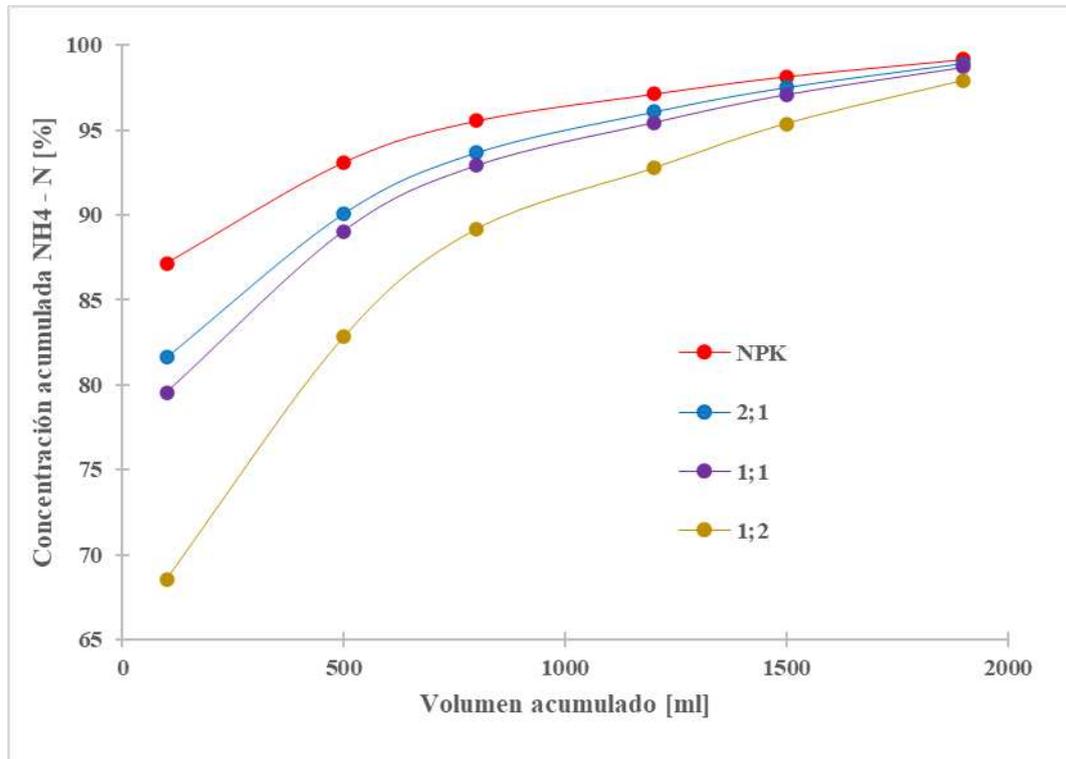
### 4.3 Columnas de lixiviación

#### 4.3.1 Amoniaco

En la Figura 4.11 se observan los valores obtenidos correspondientes a la concentración acumulada de  $NH_4 - N$  (expresada en porcentaje) respecto al volumen de agua que se utilizó al humedecer diariamente las columnas de suelo. La muestra de fertilizante NPK presenta una lixiviación más rápida, con el 87,17 % de  $NH_4 - N$  liberado al agua después de regar los primeros 100 ml, correspondientes al primer día, mientras que la muestra de fertilizante NPK/biochar 1:2 libera el 68,57 % de  $NH_4 - N$  bajo las mismas condiciones.

**Figura 4.11**

*Comportamiento de lixiviación de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  de las distintas mezclas de NPK/biochar*



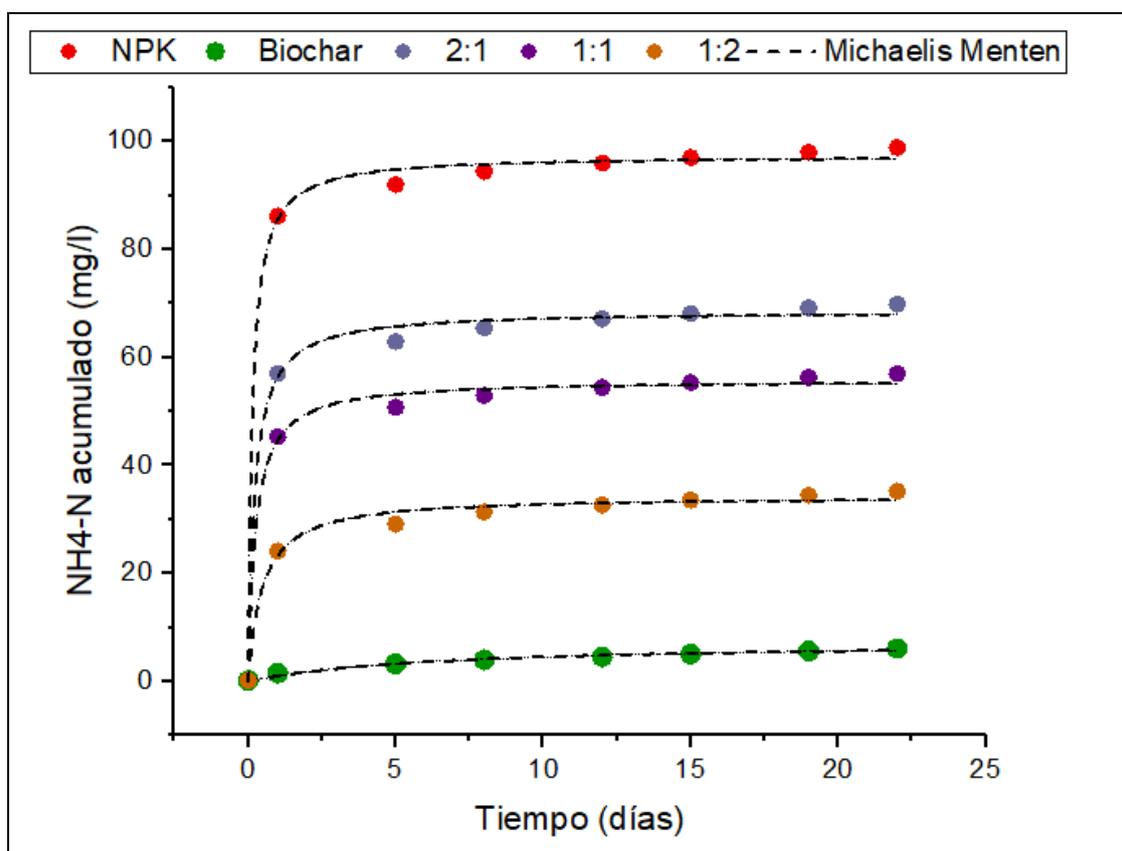
Por otra parte, en la Figura 4.12 se representa la concentración acumulada de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  respecto al tiempo, ajustando los datos experimentales al modelo modificado de Michaelis Menten.

Se observa que la concentración de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  acumulada disminuye a medida que aumenta el contenido de biochar, pasando de un valor máximo de 97,43 mg/l cuando la muestra es solo NPK a 34,32 mg/l en la muestra NPK/biochar 1:2. Esta situación se debe a que, al aumentarse el contenido de biochar en las formulaciones, se disminuye el contenido de NPK en las mismas, por lo que la muestra tiene menor concentración de nutrientes. Esto se subsanaría al aumentar la dosis de fertilizante NPK/biochar en los suelos, en función a los requerimientos nutricionales de los cultivos.

Se observa también que, el biochar sin adición de NPK, presenta una concentración acumulada máxima de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  igual a 7,44 mg/l, lo que indica que el biochar por sí solo presenta en su estructura nitrógeno, del cual una parte se libera en forma de  $\text{NH}_4^+$ .

**Figura 4.12**

Concentración acumulada de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  lixiviada de las distintas mezclas de NPK/biochar

**Tabla 4.3**

Ajuste al modelo modificado de Michaelis Menten de la concentración acumulada de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  lixiviado de diferentes muestras de NPK/biochar

	$A_{\max}$ [mg/l]	$t_{1/2 \max}$ [días]	$R^2$
NPK	$97,427 \pm 0,782$	$0,140 \pm 0,025$	0,998
Biochar	$7,444 \pm 0,619$	$6,423 \pm 1,577$	0,979
2:1	$68,630 \pm 0,799$	$0,220 \pm 0,041$	0,996
1:1	$55,847 \pm 0,714$	$0,252 \pm 0,047$	0,995
1:2	$34,325 \pm 0,645$	$0,472 \pm 0,089$	0,994

En la Tabla 4.3 se aprecia un adecuado ajuste de los datos experimentales al modelo modificado de Michaelis Menten, obteniéndose coeficientes de correlación ( $R^2$ ) por encima de 0,979. De este ajuste se obtuvieron los valores del tiempo necesario para alcanzar la mitad de la concentración máxima acumulada de  $\text{NH}_4 - \text{N}$  ( $t_{1/2 \max}$ ), los cuales fueron utilizados para realizar el correspondiente análisis estadístico.

#### 4.3.1.1 Análisis estadístico de lixiviación de $NH_4 - N$ .

Se realizó el análisis de Shapiro – Wilks para determinar la normalidad de los datos de  $t_{1/2 \max}$ , obteniéndose valores de probabilidad “p” mayores al nivel de significancia de 0,05, por lo que se comprueba que los datos obtenidos siguen una distribución normal (Tabla 4.4).

**Tabla 4.4**

*Análisis de Shapiro – Wilks de los datos de  $NH_4 - N$  lixiviado*

Muestra	n	Media	Desviación estándar	W*	Valor p
NPK	3	0,1400	0,0004	0,9623	0,5336
2:1	3	0,2201	0,0142	0,9926	0,8446
1:1	3	0,2524	0,0187	0,7817	0,0834
1:2	3	0,4715	0,0359	0,9450	0,4669

Posteriormente se procedió a realizar el análisis de varianza de una vía (ANOVA) mediante el empleo del software Minitab, obteniéndose los resultados indicados en la Tabla 4.5:

**Tabla 4.5**

*Tabla ANOVA de los datos de  $NH_4 - N$  lixiviado*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0,1809	0,0603	130,91	0,0000004
Error	8	0,0037	0,0005		
Total	11	0,1846			

Debido a que el valor de probabilidad “p” obtenido es menor al nivel de confianza (0,05) se acepta la hipótesis alterna, por lo que al menos uno de los tratamientos es diferente.

Mediante la prueba Tukey con el 5 % de significancia se establecieron los niveles de clasificación para todos los datos que presentaron diferencias significativas. Se observó que las mezclas de NPK/Biochar son significativamente diferentes a la muestra de NPK (Ver Tabla 4.6). No existe diferencia significativa entre la mezcla 1:1 y la mezcla 2:1. Por otro lado, la muestra 1:2 es la que presenta mayor valor de  $t_{1/2 \max}$ , por lo que la lixiviación de  $NH_4 - N$  es menor.

**Tabla 4.6**

*Comparación de parejas en método Tukey para  $NH_4 - N$*

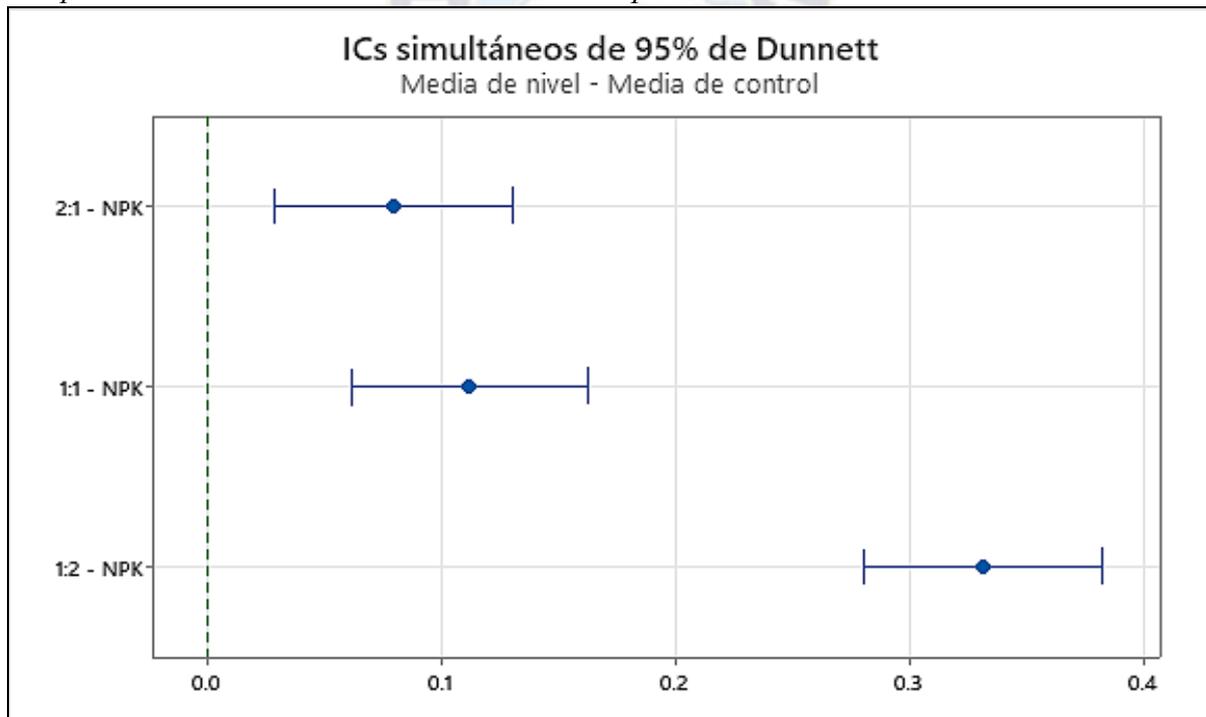
Factor	N	Media	Agrupación
1:2	3	0,4715	A
1:1	3	0,2524	B
2:1	3	0,2201	B
NPK	3	0,1400	C

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Tabla generada a partir de Minitab Statistical Software.

Los resultados del método Dunnett, con el 5 % de significancia y considerando la muestra de fertilizante NPK como control, indican que las mezclas de NPK/biochar son significativamente diferentes a la muestra de NPK (Ver Figura 4.13).

**Figura 4.13**

*Comparación de muestras en el método Dunnett para  $NH_4 - N$*



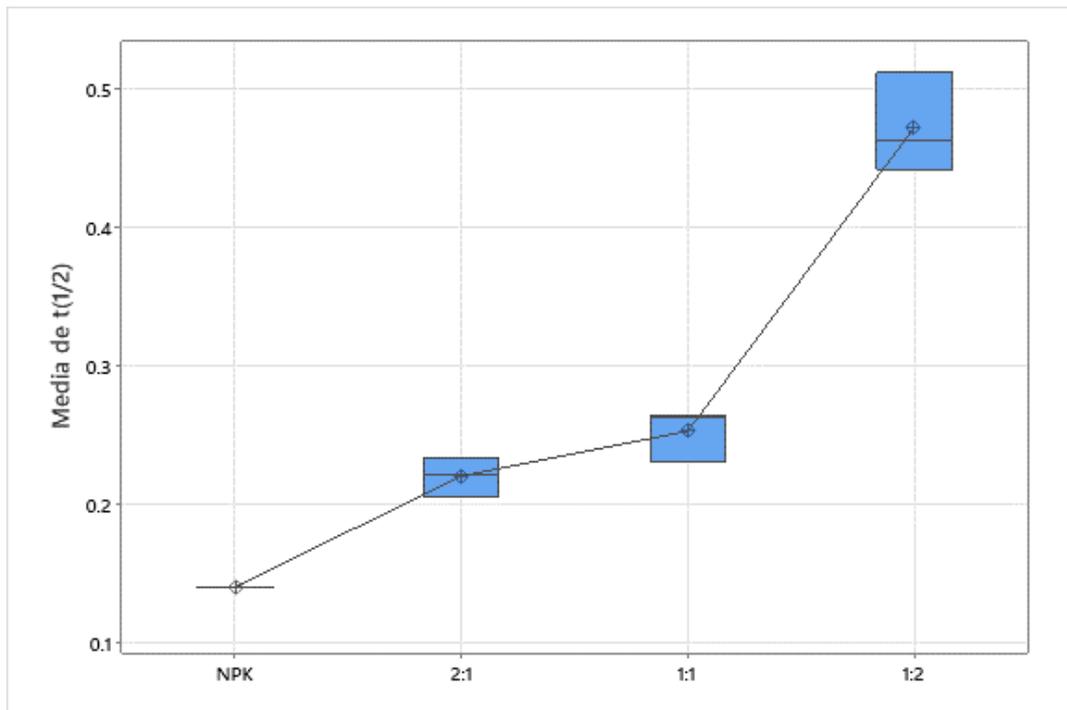
Nota: Si un intervalo no contiene cero, la media correspondiente es significativamente diferente de la media de control. Figura generada a partir de Minitab Statistical Software.

En la Figura 4.14 se observa que el valor medio de  $t_{1/2 \max}$  aumenta a medida que aumenta el contenido de biochar, por lo que la lixiviación de  $NH_4 - N$  es menor. Dicha situación puede deberse a que, al aumentar el contenido de biochar, aumenta también la cantidad de sitios

activos disponibles para la adsorción de  $\text{NH}_4\text{-N}$  (Shin & Park, 2018). La adsorción de amonio en el biochar ocurre a consecuencia de la atracción electrostática entre el  $\text{NH}_4^+$  cargado positivamente y el biochar cargado negativamente debido a la presencia de grupos ácidos orgánicos en su estructura (Rens et al., 2018).

**Figura 4.14**

*Diagrama de cajas de los valores medios para  $t_{1/2}$  (máx.) del  $\text{NH}_4\text{-N}$*

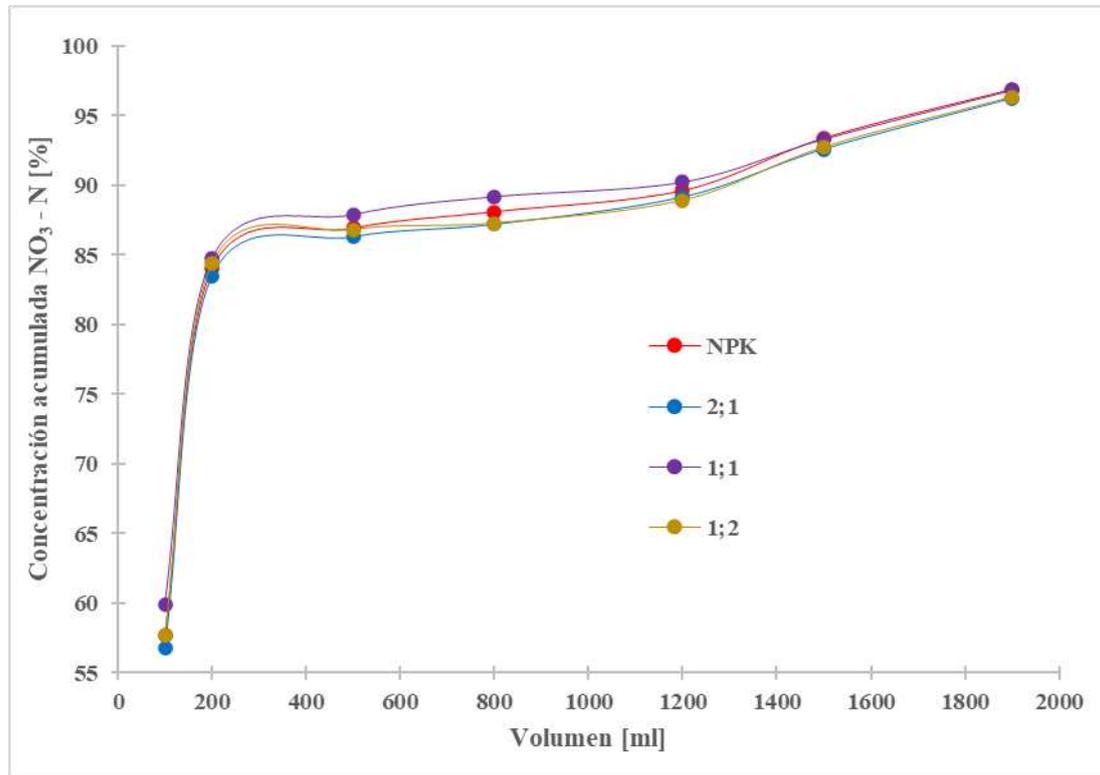


#### 4.3.2 Nitrato

En la Figura 4.15 se observan los valores obtenidos correspondientes a la concentración acumulada de  $\text{NO}_3\text{-N}$  (expresada en porcentaje) respecto al volumen de agua que se utilizó al humedecer diariamente las columnas de suelo. La muestra de fertilizante NPK presenta una lixiviación de 57,70 % de  $\text{NO}_3\text{-N}$  después de los primeros 100 ml, correspondientes al primer día, y la muestra de fertilizante NPK/biochar 1:2 libera el 57,67 % de  $\text{NO}_3\text{-N}$  bajo las mismas condiciones.

**Figura 4.15**

*Comportamiento de lixiviación de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  de las distintas mezclas de NPK/biochar*



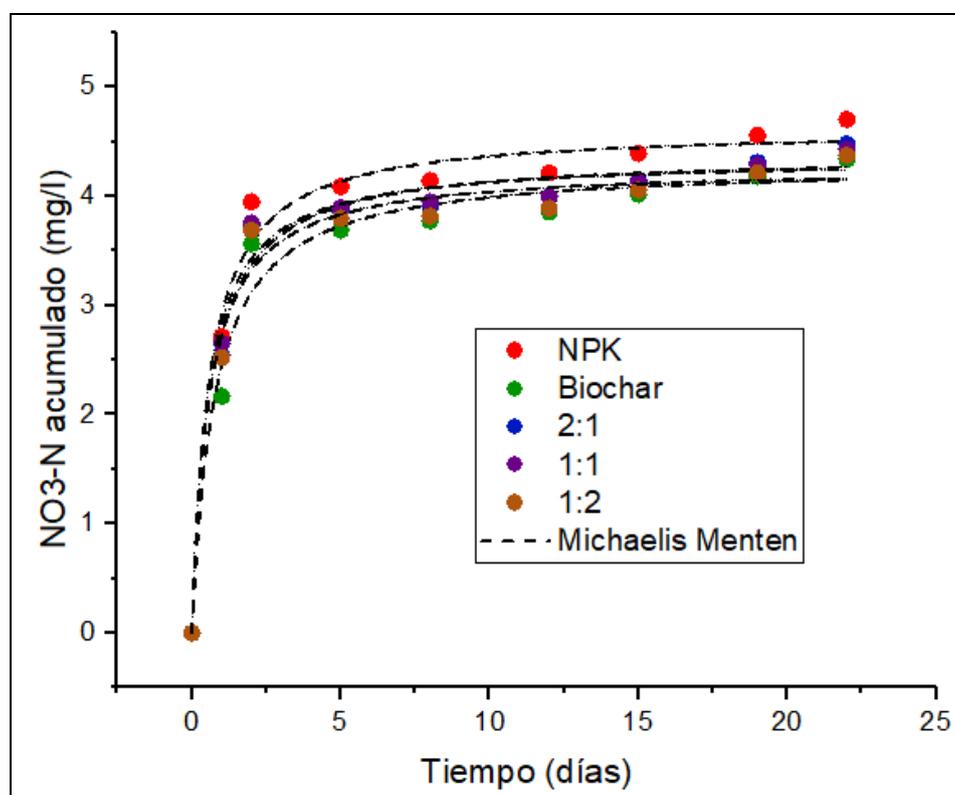
En la Figura 4.16 se observan los datos correspondientes a la concentración acumulada de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  respecto del tiempo, los cuales fueron ajustados al modelo modificado de Michaelis Menten.

La cantidad máxima de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  acumulada es ligeramente menor a medida que aumenta el contenido de biochar, pasando de un valor de 4,619 mg/l cuando la muestra es solo NPK a 4,269 mg/l en la muestra NPK/biochar 1:2. Las concentraciones de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  halladas son mucho más bajas en comparación con las concentraciones de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ , debido a la lenta nitrificación característica de los suelos arenosos, que proporcionan un hábitat menos adecuado para el desarrollo de las bacterias oxidantes de amoníaco (Mowrer, 1995).

Se observa también que el biochar sin adición de NPK presenta una cantidad acumulada de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  igual a 4,290 mg/l, lo que indica que el biochar por sí solo presenta en su estructura nitrógeno, del cual una parte se libera en forma de  $\text{NO}_3^-$ .

**Figura 4.16**

Concentración acumulada de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  lixiviada de las distintas mezclas de NPK/biochar

**Tabla 4.7**

Ajuste al modelo modificado de Michaelis Menten de la concentración acumulada de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  lixiviado de diferentes muestras de NPK/biochar

	A <sub>max</sub> [mg/l]	t <sub>1/2 max</sub> [días]	R <sup>2</sup>
NPK	4,619 ± 0,112	0,584 ± 0,112	0,983
Biochar	4,290 ± 0,133	0,754 ± 0,162	0,975
2:1	4,377 ± 0,111	0,604 ± 0,119	0,982
1:1	4,348 ± 0,096	0,561 ± 0,098	0,986
1:2	4,269 ± 0,105	0,569 ± 0,113	0,982

Los datos experimentales se ajustaron adecuadamente al modelo modificado de Michaelis Menten (Tabla 4.7), presentando valores del coeficiente de correlación ( $R^2$ ) superiores a 0,975. De este ajuste se obtuvieron los valores del tiempo necesario para conseguir la mitad de la concentración máxima acumulada de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  ( $t_{1/2 \text{ max}}$ ), los cuales fueron utilizados para realizar el análisis estadístico correspondiente.

#### 4.3.2.1 Análisis estadístico $NO_3 - N$

Se realizó el análisis de Shapiro – Wilks para determinar la normalidad de los datos de  $t_{1/2 \max}$ , obteniéndose valores de probabilidad “p” mayores al nivel de significancia de 0,05, por lo que se comprueba que los datos obtenidos siguen una distribución normal (Tabla 4.8).

**Tabla 4.8**

*Análisis de Shapiro – Wilks de los datos de  $NO_3 - N$  lixiviado*

Muestra	n	Media	Desviación estándar	W*	Valor p
NPK	3	0,5838	0,0196	0,8594	0,2655
2:1	3	0,6035	0,1095	0,8988	0,3584
1:1	3	0,5609	0,0286	0,9629	0,5398
1:2	3	0,5688	0,0257	0,8706	0,2919

Posteriormente se procedió a realizar el análisis de varianza de una vía (ANOVA) mediante el empleo del software Minitab, obteniéndose los resultados indicados en la Tabla 4.9:

**Tabla 4.9**

Tabla ANOVA de los datos de  $NO_3 - N$  lixiviado

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0,0032	0,001054	0,30	0,822
Error	8	0,0277	0,003466		
Total	11	0,0309			

Debido a que el valor de probabilidad “p” obtenido es mayor al nivel de confianza (0,05) se acepta la hipótesis nula, por lo que no existe diferencia significativa entre tratamientos. Esto se ve corroborado con el método Tukey (Tabla 4.10) y con el método Dunnett (Figura 4.17).

**Tabla 4.10**

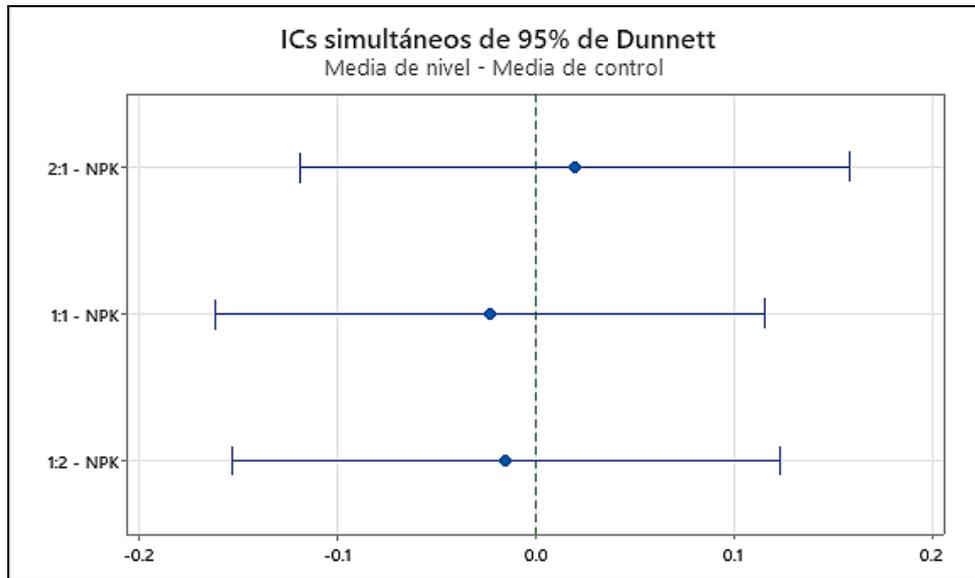
*Comparación de muestras en el método Tukey para  $NO_3 - N$*

Factor	N	Media	Agrupación
NPK	3	0,5838	A
2:1	3	0,6035	A
1:2	3	0,5688	A
1:1	3	0,5609	A

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

**Figura 4.17**

*Comparación de muestras en el método Dunnett para  $\text{NO}_3 - \text{N}$*

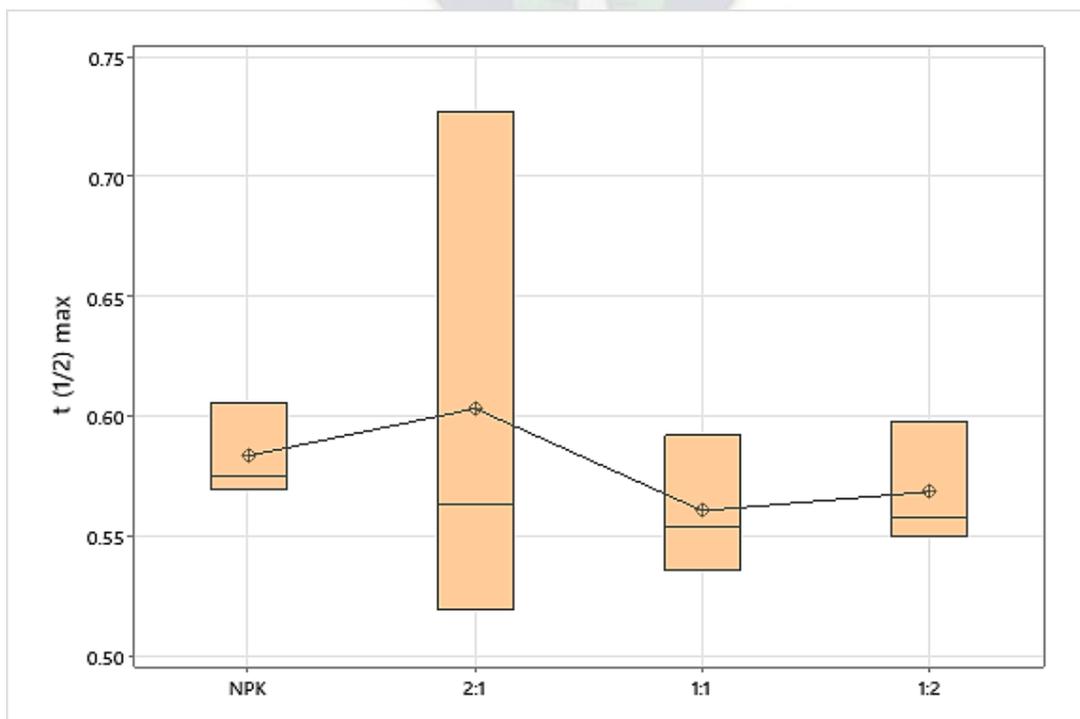


Nota: Si un intervalo no contiene cero, la media correspondiente es significativamente diferente de la media de control. Figura generada a partir de Minitab Statistical Software.

En la Figura 4.18, se observa que no existen diferencias significativas entre los valores de  $t_{1/2 \text{ max}}$  obtenidos, debido a que las medias se superponen entre sí.

**Figura 4.18**

*Diagrama de cajas de los valores medios para  $t_{1/2}$  (máx.) del  $\text{NO}_3 - \text{N}$*

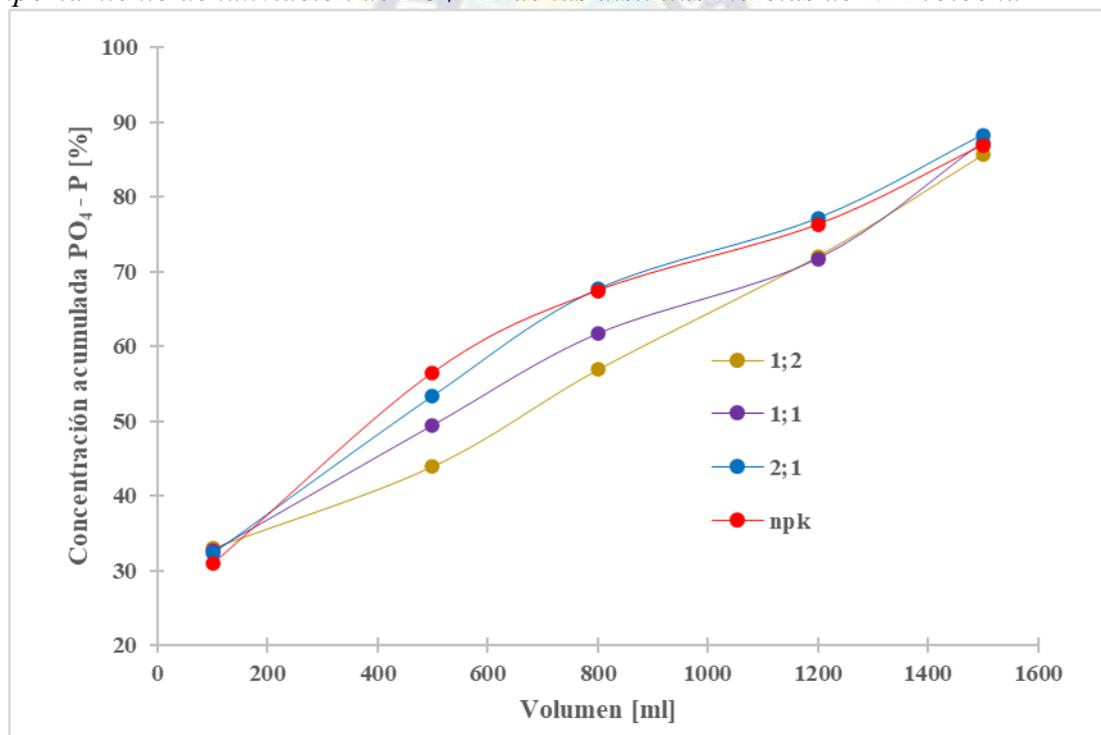


### 4.3.3 Fosfato

En la Figura 4.19 se observan los valores obtenidos correspondientes a la concentración acumulada de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  (expresada en porcentaje) respecto al volumen de agua que se utilizó al humedecer diariamente las columnas de suelo. Todas las muestras liberan un porcentaje similar de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  al regar con los primeros 100 ml, sin embargo, en los días posteriores, la muestra de fertilizante NPK presenta una lixiviación ligeramente más rápida, con el 56,48 % de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  liberado al agua después de regar 500 ml, correspondientes al quinto día, mientras que la muestra de fertilizante NPK/biochar 1:2 libera el 43,95 % de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  bajo las mismas condiciones.

**Figura 4.19**

*Comportamiento de lixiviación de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  de las distintas mezclas de NPK/biochar*

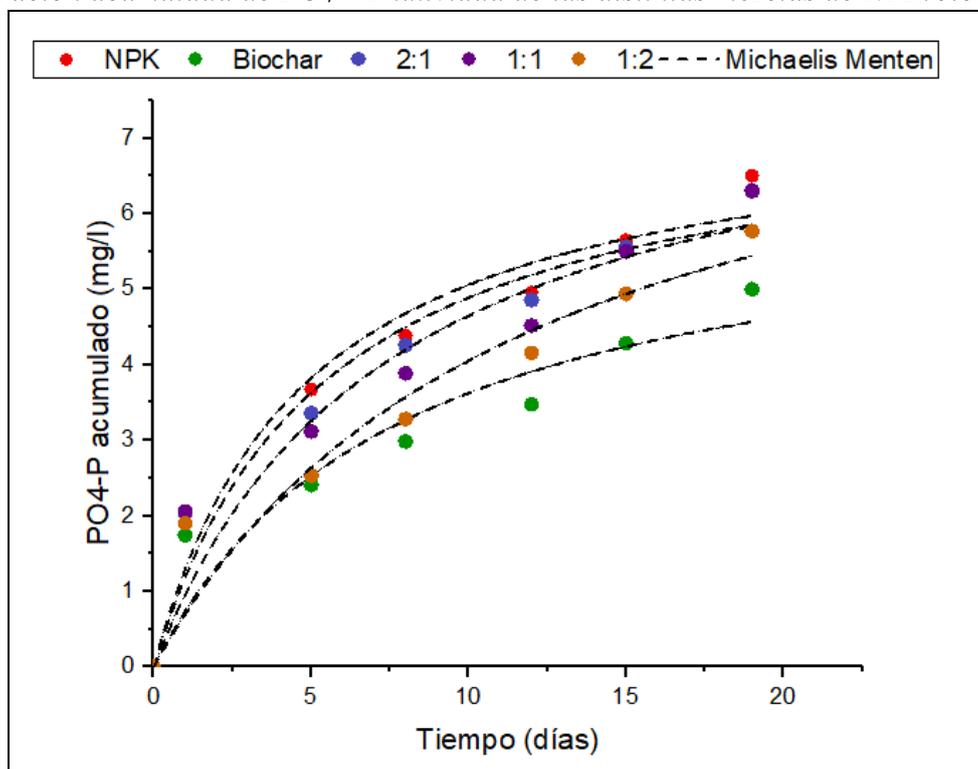


En la Figura 4.20 se observan los datos correspondientes a la concentración acumulada de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  respecto del tiempo, los cuales fueron ajustados al modelo modificado de Michaelis Menten. Se observa que la cantidad de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  acumulada es ligeramente menor a medida que aumenta el contenido de biochar, pasando de un valor de 6,500 mg/l cuando la muestra es solo NPK a 5,765 mg/l en la muestra NPK/biochar 1:2. La concentración de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  acumulada es menor en comparación con la concentración acumulada de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ , debido a la baja solubilidad del fósforo presente en la roca fosfórica.

Se observa también que el biochar sin adición de NPK presenta una cantidad acumulada de  $PO_4 - P$  igual a 4,995 mg/l, lo que indica que el biochar por sí solo presenta en su estructura fósforo, el cual se libera en forma de  $PO_4^{-3}$ .

**Figura 4.20**

*Concentración acumulada de  $PO_4 - P$  lixiviada de las distintas mezclas de NPK/biochar*



**Tabla 4.11**

*Ajuste al modelo modificado de Michaelis Menten de la concentración acumulada de  $PO_4 - P$  lixiviado de diferentes muestras de NPK/biochar*

	$A_{max}$ [mg/l]	$t_{1/2 \max}$ [día]	$R^2$
NPK	$7,464 \pm 0,859$	$4,765 \pm 1,745$	0,965
Biochar	$6,415 \pm 1,562$	$7,704 \pm 4,686$	0,911
2:1	$7,489 \pm 0,989$	$5,327 \pm 2,115$	0,959
1:1	$8,147 \pm 1,680$	$7,530 \pm 3,923$	0,935
1:2	$8,775 \pm 2,610$	$11,664 \pm 7,160$	0,923

Los datos experimentales se ajustaron adecuadamente al modelo modificado de Michaelis Menten, presentando valores de coeficiente de correlación ( $R^2$ ) por encima de 0,911 (Tabla 4.11). De este ajuste se obtuvieron los valores del tiempo necesario para conseguir la mitad de

la concentración máxima acumulada de  $PO_4 - P$  ( $t_{1/2 \max}$ ), los cuales fueron utilizados para realizar el análisis estadístico correspondiente.

#### 4.3.3.1 Análisis estadístico de lixiviación de $PO_4 - P$

Se realizó el análisis de Shapiro – Wilks para determinar la normalidad de los datos de  $t_{1/2 \max}$ , obteniéndose valores de probabilidad “p” mayores al nivel de significancia de 0,05, por lo que se comprueba que los datos obtenidos siguen una distribución normal (Tabla 4.12).

**Tabla 4.12**

*Análisis de Shapiro – Wilks de los datos de  $PO_4 - P$  lixiviado*

Muestra	n	Media	Desviación estándar	W*	Valor p
NPK	3	4,9055	0,7020	0,9548	0,4901
2:1	3	5,3268	0,0322	0,8761	0,3049
1:1	3	7,5817	0,7054	0,7897	0,1018
1:2	3	11,7190	1,3679	0,9769	0,6048

Posteriormente se procedió a realizar el análisis de varianza de una vía (ANOVA) mediante el empleo del software Minitab, obteniéndose los resultados indicados en la Tabla 4.13:

**Tabla 4.13**

*Tabla ANOVA de los datos de  $NO_3 - N$  lixiviado*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	87,620	29,207	40,812	0,00003
Error	8	5,725	0,716		
Total	11	93,345			

Debido a que el valor p obtenido es menor al nivel de confianza (0,05) se acepta la hipótesis alterna, por lo que al menos uno de los tratamientos es diferente.

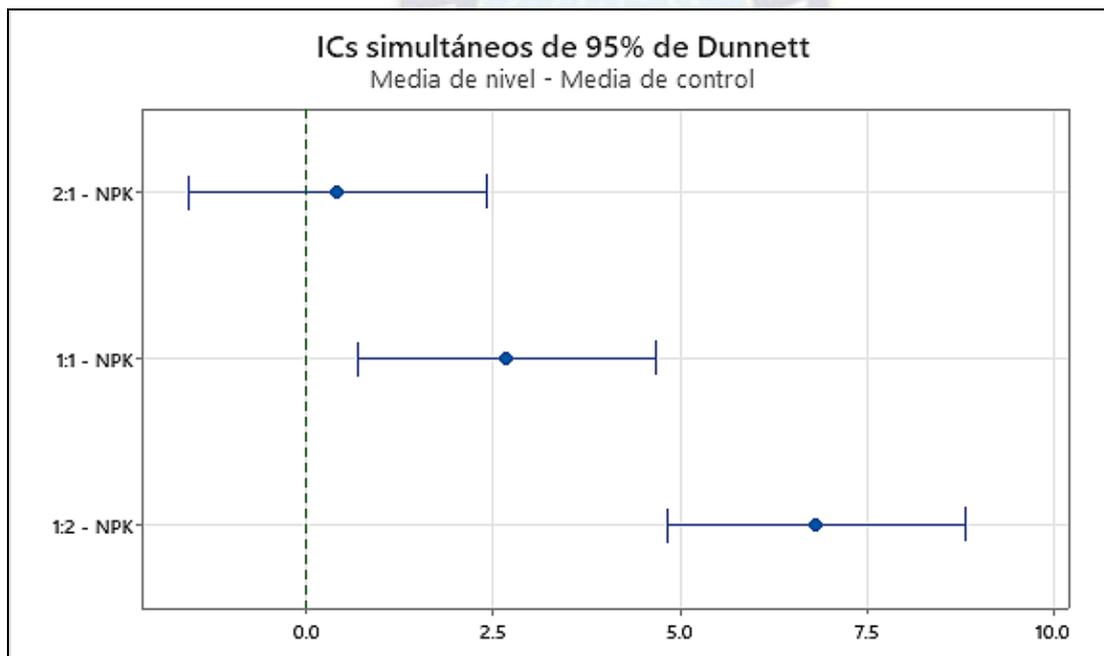
Del método Tukey a un nivel de significancia de 5 % (ver Tabla 4.14) se observa que la mezcla 2:1 y la muestra de NPK no son significativamente diferentes. Por otra parte, las mezclas 1:1 y 1:2 si son significativamente diferente entre sí. La muestra 1:2 es la que presenta mayor valor de  $t_{1/2 \max}$ , por lo que la lixiviación de  $PO_4 - P$  es menor.

**Tabla 4.14***Comparación de muestras en el método Tukey para PO<sub>4</sub> - P*

Factor	N	Media	Agrupación
1:2	3	11,719	A
1:1	3	7,582	B
2:1	3	5,3267	C
NPK	3	4,905	C

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

Los resultados del método Dunnett a un nivel de significancia del 5 % (ver Figura 4.21), considerando la muestra de NPK como control, indican que las mezclas 1:1 y 1:2 son significativamente diferentes a la muestra de NPK.

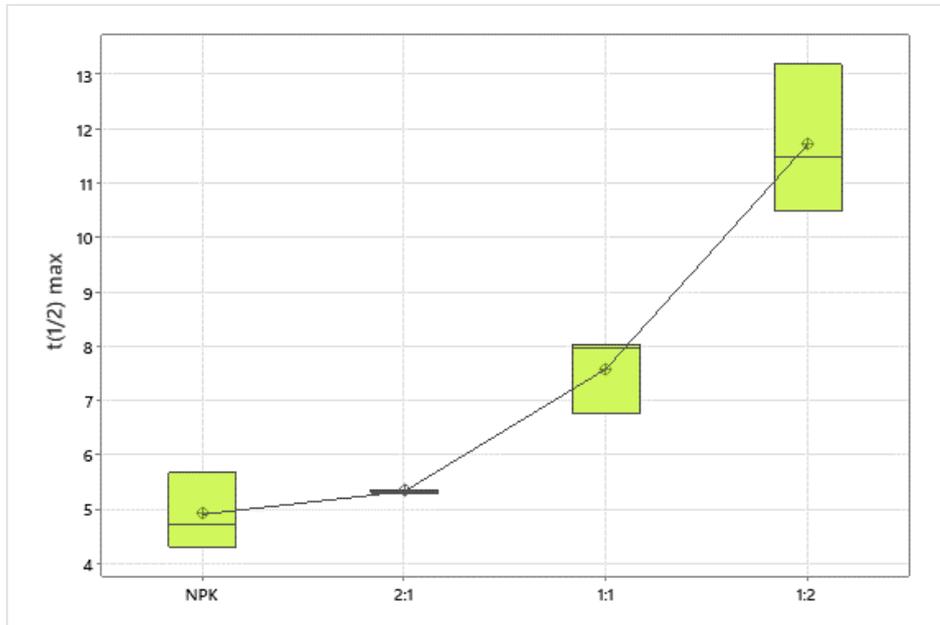
**Figura 4.21***Comparación de muestras en el método Dunnett para PO<sub>4</sub> - P*

Nota: Si un intervalo no contiene cero, la media correspondiente es significativamente diferente de la media de control. Figura generada a partir de Minitab Statistical Software.

En la Figura 4.22, se observa que el valor de  $t_{1/2 \max}$  aumenta a medida que aumenta el contenido de biochar, por lo que la lixiviación de PO<sub>4</sub> - P es menor. Dicha situación puede deberse a que, al aumentar el contenido de biochar, aumenta la cantidad de sitios activos disponibles para la adsorción de PO<sub>4</sub> - P en la superficie del biochar a consecuencia del calcio presente en su estructura.

**Figura 4.22**

*Diagrama de cajas de los valores medios para  $t_{1/2}$  (máx.) del  $PO_4 - P$*

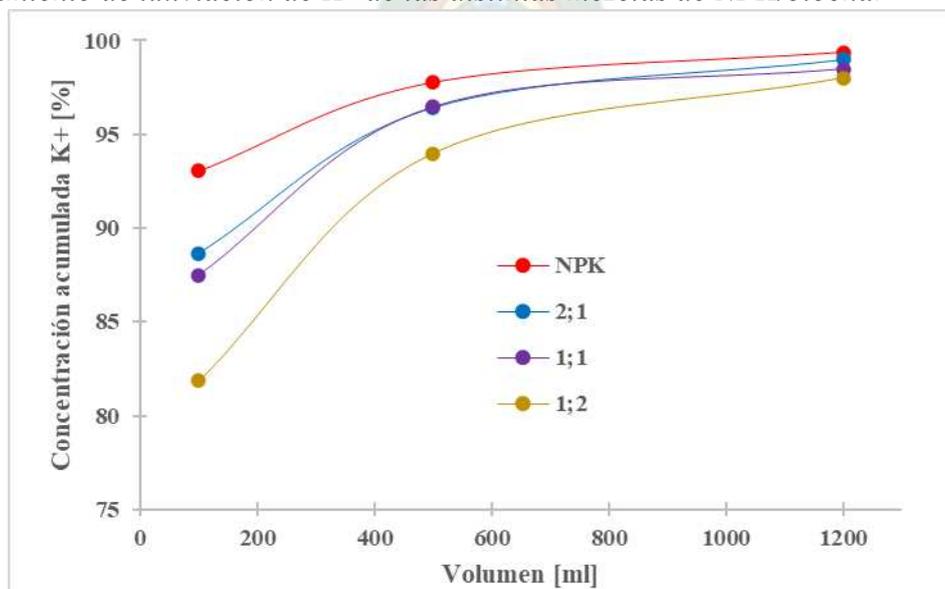


#### 4.3.4 Potasio

En la Figura 4.23 se observan los valores obtenidos correspondientes a la concentración acumulada de  $K^+$  (expresada en porcentaje) respecto al volumen de agua que se utilizó al humedecer diariamente las columnas de suelo. La muestra de fertilizante NPK presenta una lixiviación más rápida, con el 93,05 % de  $K^+$  liberado al agua después de regar los primeros 100 ml, correspondientes al primer día, mientras que la muestra de fertilizante NPK/biochar 1:2 libera el 81,85 % de  $K^+$  bajo las mismas condiciones.

**Figura 4.23**

*Comportamiento de lixiviación de  $K^+$  de las distintas mezclas de NPK/biochar*



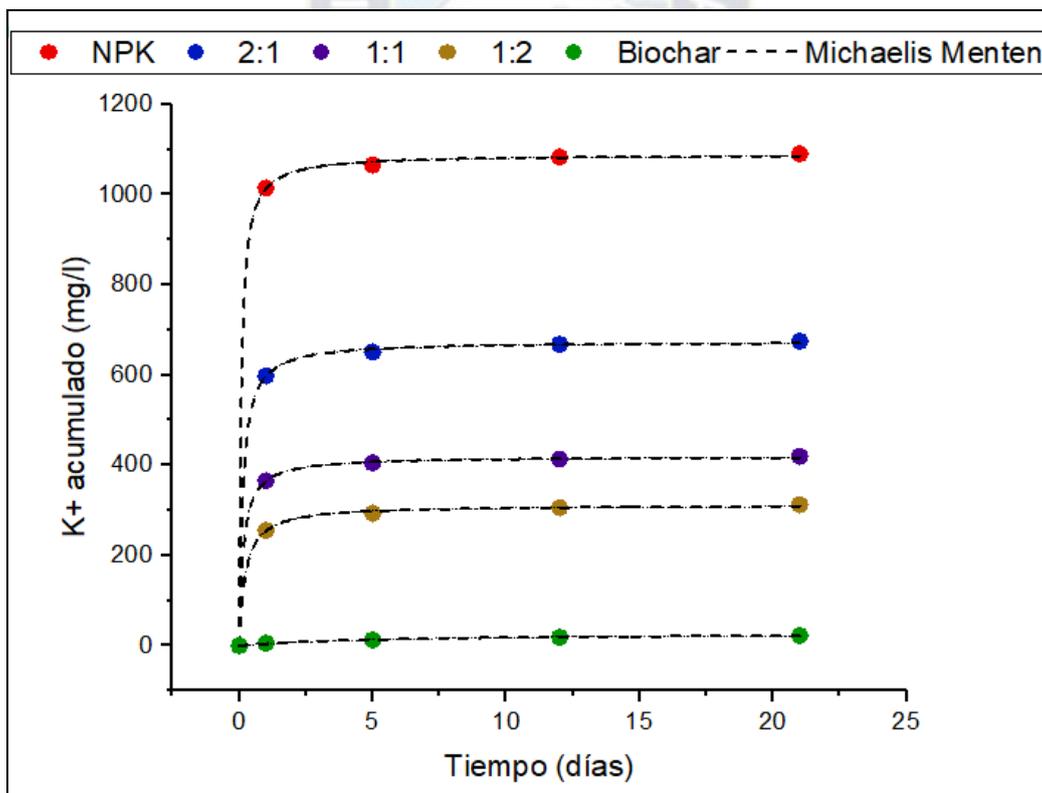
Por otra parte, en la Figura 4.24 se representa la concentración acumulada de  $K^+$  respecto al tiempo, ajustando los datos experimentales al modelo modificado de Michaelis Menten.

Se observa que la concentración de  $K^+$  acumulada disminuye a medida que aumenta el contenido de biochar, pasando de un valor máximo de 1088,64 mg/l cuando la muestra es solo NPK a 311,696 mg/l en la muestra NPK/biochar 1:2. Al igual que en el caso del  $NH_4 - N$ , esta situación se debe a que, al aumentarse el contenido de biochar en las formulaciones, se disminuye el contenido de NPK en las mismas, por lo que la muestra tiene menor concentración de nutrientes. Esto se subsanaría al aumentar la dosis de fertilizante NPK/biochar en los suelos, en función a los requerimientos nutricionales de los cultivos.

Se observa también que, el biochar sin adición de NPK, presenta una concentración acumulada máxima de  $K^+$  igual a 27,890 mg/l, lo que indica que el biochar por sí solo presenta en su estructura potasio.

**Figura 4.24**

*Concentración acumulada de  $K^+$  lixiviada de las distintas mezclas de NPK/biochar*



**Tabla 4.15**

*Ajuste al modelo modificado de Michaelis Menten de la concentración acumulada de K<sup>+</sup> lixiviado de diferentes muestras de NPK/biochar*

	<b>A<sub>max</sub> [mg/l]</b>	<b>t<sub>1/2 max</sub> [día]</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
NPK	1088,64 ± 3,465	0,075 ± 0,007	0,999
Biochar	27,890 ± 1,797	5,349 ± 1,037	0,994
2:1	674,513 ± 3,188	0,130 ± 0,011	0,999
1:1	419,652 ± 1,601	0,150 ± 0,009	0,999
1:2	311,696 ± 2,522	0,225 ± 0,022	0,999

Los datos experimentales se ajustaron adecuadamente al modelo modificado de Michaelis Menten, presentando valores de coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) por encima de 0,994 (Tabla 4.15). De este ajuste se obtuvieron los valores del tiempo necesario para conseguir la mitad de la concentración máxima acumulada de K<sup>+</sup> (t<sub>1/2 max</sub>), los cuales fueron utilizados para realizar el análisis estadístico correspondiente.

#### 4.3.4.1 Análisis estadístico lixiviación de K<sup>+</sup>

Se realizó el análisis de Shapiro – Wilks para determinar la normalidad de los datos de t<sub>1/2 max</sub>, obteniéndose valores de probabilidad “p” mayores al nivel de significancia de 0,05, por lo que se comprueba que los datos obtenidos siguen una distribución normal (Tabla 4.16).

**Tabla 4.16**

*Análisis de Shapiro – Wilks de los datos de K<sup>+</sup> lixiviado*

<b>Muestra</b>	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>W*</b>	<b>Valor p</b>
NPK	3	0,07485	0,0070	0,9983	0,9163
2:1	3	0,1295	0,0118	0,9991	0,9536
1:1	3	0,1496	0,0093	0,9958	0,8777
1:2	3	0,2239	0,0213	0,9982	0,9105

Posteriormente se procedió a realizar el análisis de varianza de una vía (ANOVA) mediante el empleo del software Minitab, obteniéndose los resultados indicados en la Tabla 4.17:

**Tabla 4.17***Tabla ANOVA de los datos de K<sup>+</sup> lixiviado*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	3	0,034367	0,011456	63,03	0,00001
Error	8	0,001454	0,000182		
Total	11	0,035821			

Debido a que el valor de probabilidad “p” obtenido es menor al nivel de confianza (0,05) se acepta la hipótesis alterna, por lo que al menos uno de los tratamientos es diferente.

Mediante la prueba Tukey con el 5 % de significancia se establecieron los niveles de clasificación para todos los datos que presentaron diferencias significativas. Se observó que las mezclas de NPK/Biochar son significativamente diferentes a la muestra de NPK (Ver Tabla 4.18). No existe diferencia significativa entre la mezcla 1:1 y la mezcla 2:1. Por otro lado, la muestra 1:2 es la que presenta mayor valor de  $t_{1/2 \text{ max}}$ , por lo que la lixiviación de K<sup>+</sup> es menor.

**Tabla 4.18***Comparación de parejas en método Tukey para K<sup>+</sup>*

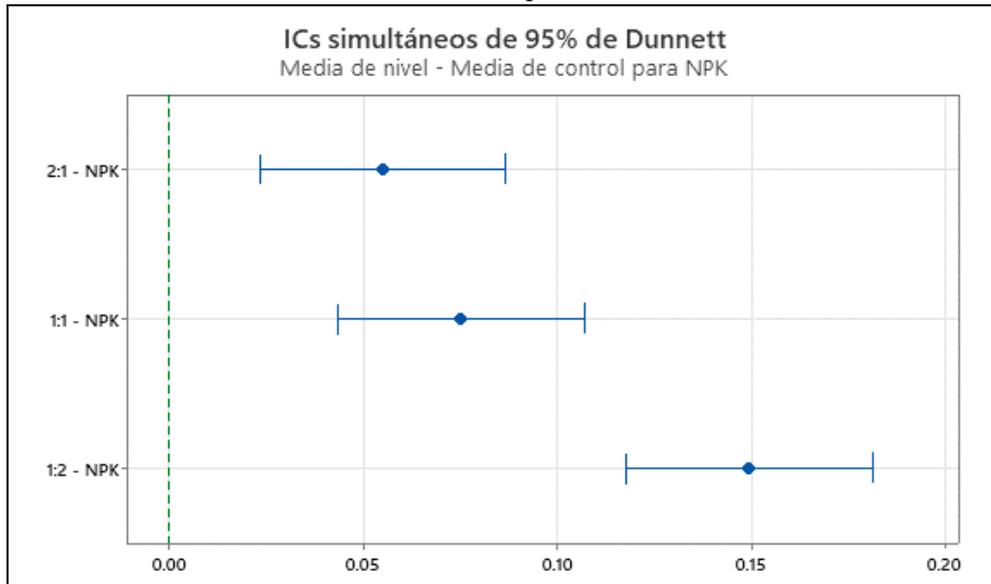
Factor	N	Media	Agrupación
1:2	3	0,2239	A
1:1	3	0,1497	B
2:1	3	0,1295	B
NPK	3	0,0745	C

Nota: Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes. Tabla generada a partir de Minitab Statistical Software.

Los resultados del método Dunnett, con el 5 % de significancia y considerando la muestra de fertilizante NPK como control, indican que las mezclas de NPK/biochar son significativamente diferentes a la muestra de NPK (Ver Figura 4.25).

**Figura 4.25**

*Comparación de muestras en el método Dunnett para  $K^+$*

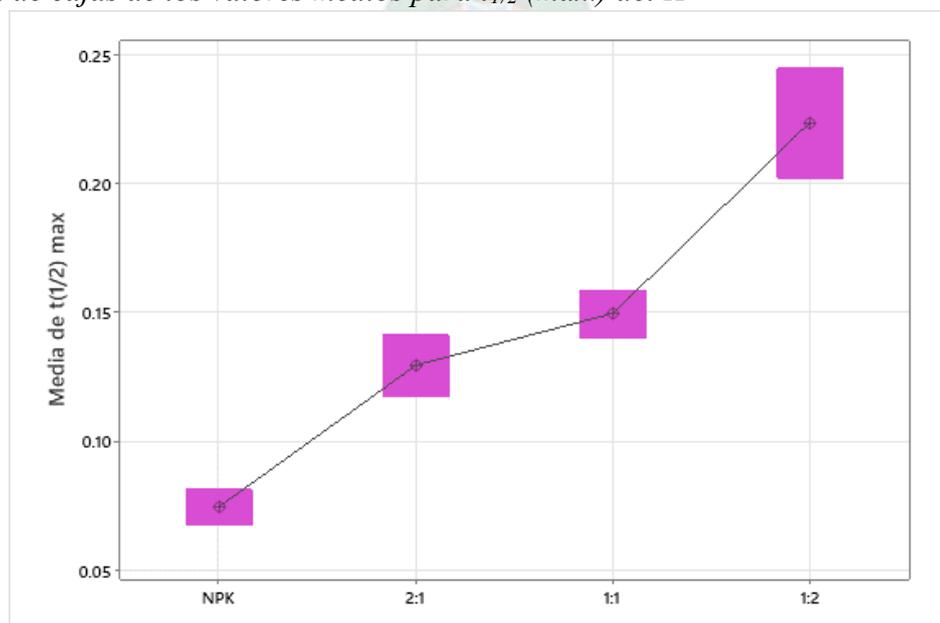


Nota: Si un intervalo no contiene cero, la media correspondiente es significativamente diferente de la media de control. Figura generada a partir de Minitab Statistical Software.

En la Figura 4.26, se observa que el valor medio de  $t_{1/2 \max}$  aumenta a medida que aumenta el contenido de biochar, por lo que la lixiviación de  $K^+$  es menor. Dicha situación puede deberse a que, al aumentar el contenido de biochar, aumenta la cantidad de sitios activos disponibles para la adsorción de  $K^+$ . Al igual que en el caso del  $NH_4^+$ , la adsorción de  $K^+$  en la superficie del biochar ocurre a consecuencia de la atracción electrostática entre el  $K^+$  y la superficie del biochar que se encuentra cargada negativamente (Gwenzi et al., 2018).

**Figura 4.26**

*Diagrama de cajas de los valores medios para  $t_{1/2}$  (máx.) del  $K^+$*



Tras realizar el correspondiente análisis estadístico de los diferentes iones lixiviados se determinó como formulación óptima la relación NPK/biochar 1:2, debido a que bajo esta formulación se libera de forma más lenta los iones  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{K}^+$ .

#### 4.4 Proceso de producción del fertilizante NPK/Biochar óptimo

El proceso de producción de las pastillas de fertilizante NPK/biochar 1:2 tiene como etapas principales la pirólisis y el empastillado.

##### 4.4.1 Etapa de pirólisis

Se realizaron 5 pruebas de pirólisis, partiendo de una masa de residuos de poda " $m_{poda}$ " igual a 135 g, posteriormente se registraron las masas de biochar obtenido al finalizar el proceso " $m_{biochar}$ ", calculándose con estas el rendimiento de pirólisis de acuerdo a la Ecuación (27). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.19.

$$\eta_{pirólisis} = \frac{m_{biochar}}{m_{poda}} \times 100 \% \quad (27)$$

**Tabla 4.19**

*Balance de masa – etapa de pirólisis*

	#1	#2	#3	#4	#5
<b>Masa residuos de poda [g]</b>	135,106	135,033	135,215	135,056	135,157
<b>Masa biochar [g]</b>	41,386	41,832	41,769	41,059	42,126
<b>Rendimiento [%]</b>	30,632	30,979	30,891	30,401	31,168

El rendimiento de pirólisis promedio obtenido es igual a  $30,814 \% \pm 0,301 \%$ , el cual es similar al reportado en bibliografía, debido a que durante la pirólisis el carbón presente en la biomasa no solo se convierte en biochar si no también en productos volátiles, reduciendo de este modo el rendimiento del biochar (Veksha et al., 2014).

##### 4.4.2 Etapa de empastillado

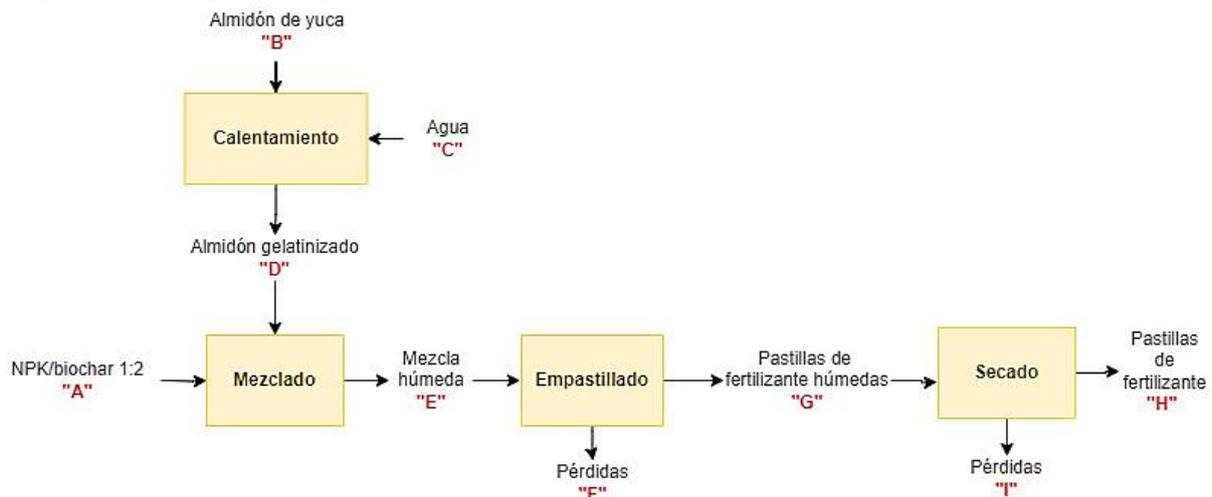
Se realizaron 3 pruebas de empastillado, partiendo de una masa de NPK/biochar 1:2 igual a 10 g. Siguiendo el diagrama de la Figura 4.27 se registraron las masas de las diferentes corrientes, determinándose el rendimiento del proceso y las pérdidas, de acuerdo a las Ecuaciones (28) y (29). Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla 4.20.

$$\eta_{empastillado} = \frac{m_{pastillas\ (final)}}{m_{biochar} + m_{almidón} + m_{NPK}} \times 100\% \quad (28)$$

$$\eta_{pérdidas} = 100\% - \eta_{empastillado} \quad (29)$$

**Figura 4.27**

*Diagrama de etapa de empastillado*



**Tabla 4.20**

*Balance de masa – etapa de empastillado*

ENTRADAS [g]				
Etapa	Corriente	#1	#2	#3
Calentamiento	B	0,647	0,648	0,648
	C	8,008	7,986	8,101
Mezclado	D	8,655	8,634	8,749
	A	10,005	10,146	9,998
Empastillado	E	18,660	18,780	18,747
Secado	G	17,721	17,798	17,314
SALIDAS [g]				
Etapa	Corriente	#1	#2	#3
Calentamiento	D	8,655	8,634	8,749
Mezclado	E	18,660	18,780	18,747
Empastillado	F	0,939	0,982	1,433
	G	17,721	17,798	17,314
Secado	H	10,159	10,142	10,006
	I	7,562	7,656	7,308
<b>Rendimiento [%]</b>		95,372	93,941	93,988
<b>Pérdidas [%]</b>		4,628	6,059	6,012

El rendimiento de la etapa del empastillado promedio obtenido es igual a  $94,434 \pm 0,813$ . Se aprecia que ocurren pérdidas a consecuencia del material que queda adherido al empastillador y al agua evaporada después del secado.

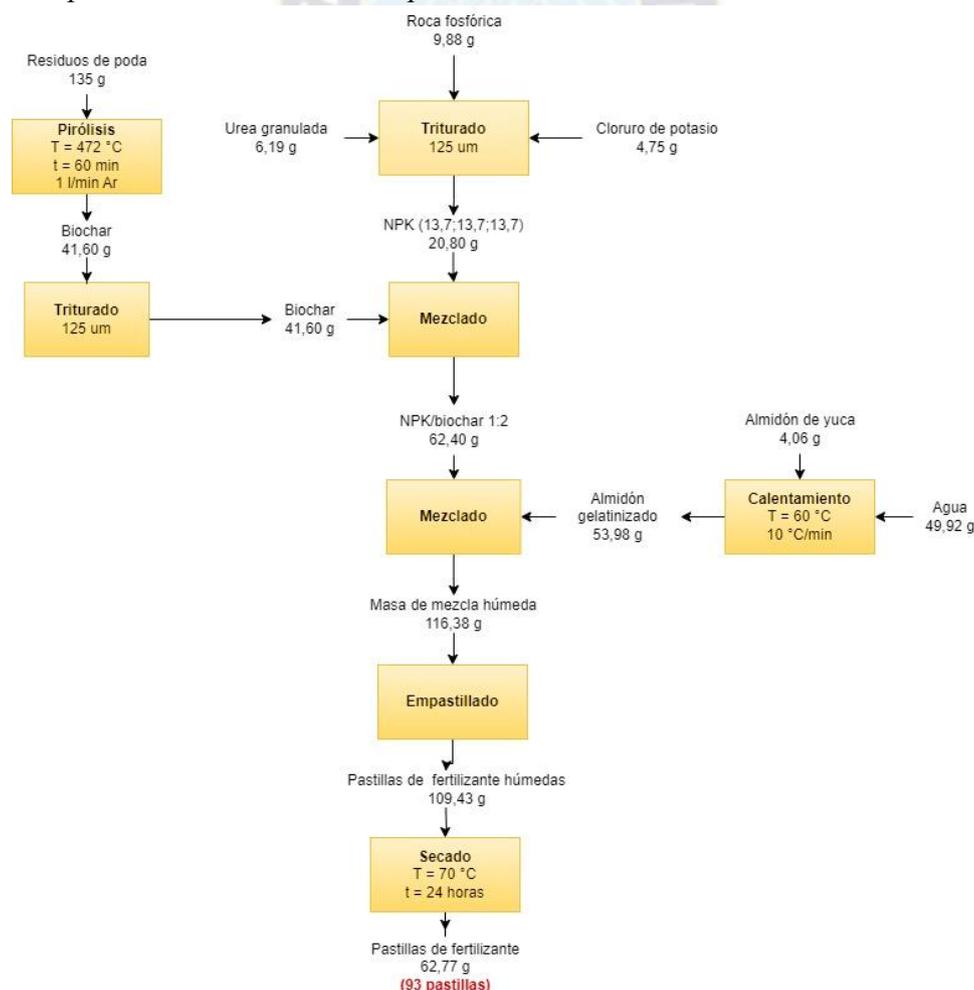
#### 4.4.3 Diagrama de proceso

En la Figura 4.28 se presenta cada una de las etapas que actúan durante el proceso de producción del fertilizante NPK/Biochar 1:2 junto con sus respectivas entradas y salidas en unidades de masa [g].

El diagrama fue elaborado en base a los promedios de los balances obtenidos en el punto anterior, partiendo de 135 g de residuos de poda, debido a que esta es la cantidad máxima de materia prima que se puede tratar por lote en el horno reactor con el que se cuenta actualmente. Se obtendrían como rendimiento global del proceso 40,20 % lo que corresponde a un total de 93 pastillas de fertilizante NPK/biochar 1:2.

**Figura 4.28**

*Diagrama de proceso – Elaboración de pastillas NPK/biochar 1:2*



**“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA  
A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**

# **5. CONCLUSIONES**



Martínez Paredes Giancarla Ximena

**Tutor:** PhD. Luis G. López Nina

## **5. CONCLUSIONES**

### **5.1 Conclusiones respecto al primer objetivo**

La adición de biochar en la formulación del fertilizante NPK tiene un efecto positivo en sus propiedades fisicoquímicas. Se observó un aumento en el área superficial de hasta casi 6 veces al valor obtenido solo con NPK, debido a la porosidad característica del biochar la cual también permite un aumento en la retención de agua en lecho de suelo (1,3 veces superior al NPK) y la absorción de agua (21 veces superior al NPK).

Todas las muestras presentan un pH básico (desde 8,4 en el fertilizante NPK hasta 9,8 en la mezcla de NPK/biochar 1:2), el cual es directamente proporcional al contenido de biochar, permitiendo su potencial aplicación en suelos con problemas de acidez elevada como los encontrados en regiones de los yungas y algunos lugares del altiplano boliviano.

La conductividad eléctrica disminuye al aumentarse el contenido de biochar (desde 17,8 mS/cm en el fertilizante NPK hasta 6,4 mS/cm en el fertilizante NPK/biochar 1:2), debido a que el biochar por sí solo presenta una baja concentración de sales en su estructura. La baja conductividad eléctrica permite su aplicación en suelos poco salinos como los encontrados en el altiplano norte.

### **5.2 Conclusiones respecto al segundo objetivo**

Las pruebas se realizaron trabajando a una relación de volumen de agua por volumen de suelo igual a 0,8, siendo un valor 67 veces superior al necesario para simular las condiciones de precipitación en el Altiplano Boliviano (450 mm/año son iguales a una relación de volumen de agua por volumen de suelo de 0,012 para una columna de las dimensiones trabajadas en el laboratorio), por lo que los resultados obtenidos fueron elaborados con un gran exceso de precipitación.

El fertilizante NPK libera 84,17 % de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ , 93,05% de  $\text{K}^+$ , 57,70 % de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  y 39,06 % de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  tras regar 100 ml de agua en el primer día. La mezcla de NPK con biochar en una relación másica de 1:2 libera 68,57% de  $\text{NH}_4 - \text{N}$ , 81,85% de  $\text{K}^+$ , 57,67 % de  $\text{NO}_3 - \text{N}$  y 40,23% de  $\text{PO}_4 - \text{P}$  bajo las mismas condiciones anteriores por lo que la lixiviación de nutrientes es menor, principalmente en el caso del amonio y potasio.

Los datos hallados se ajustaron adecuadamente al modelo modificado de Michaelis Menten obteniéndose coeficientes de correlación por encima de 0,911. Del modelo matemático se determinaron los valores de la concentración máxima acumulada “ $A_{max}$ ” y del tiempo en el que se libera la mitad de la concentración máxima acumulada “ $t_{1/2 max}$ ”. Se observó que los valores de  $A_{max}$  aumentan a medida que aumenta el contenido de NPK en las formulaciones (en el caso del  $NH_4 -N$  y del  $K^+$  el valor de  $A_{max}$  del NPK es 2,8 y 3,5 veces superior al obtenido con la mezcla de fertilizante NPK/biochar 1:2).

Los valores de  $t_{1/2 max}$  determinados fueron utilizados para realizar el correspondiente análisis de varianza de una vía donde, en el caso del  $NH_4 - N$ ,  $PO_4 - P$  y  $K^+$ , se hallaron valores de probabilidad menores al nivel de significancia por lo que se aceptó la hipótesis alterna que indica que al menos uno de los tratamientos es diferente. En el caso del  $NO_3 - N$  el valor de probabilidad fue mayor al nivel de significancia, por lo que se aceptó la hipótesis nula, indicando que no existe variación entre tratamientos.

Tras aplicar el método Tukey y el método Dunnett, considerando como muestra control al fertilizante NPK, se observó que el valor de  $t_{1/2 max}$  del  $NH_4 - N$ ,  $PO_4 - P$  y  $K^+$  es mayor al aumentarse el contenido de biochar las formulaciones (en el caso del  $NH_4 -N$ ,  $PO_4-P$  y  $K^+$  el valor de  $t_{1/2 max}$  del fertilizante NPK/biochar 1:2 es 3,7, 2,4 y 3 veces superior al obtenido con NPK), por lo que la lixiviación de nutrientes es más lenta. Mientras que en el caso del  $NO_3 - N$ , el  $t_{1/2 max}$  no se ve afectado por la adición de biochar.

La retención de  $NH_4 - N$ ,  $PO_4 - P$  y  $K^+$  por parte del biochar puede deberse a la atracción electrostática entre la carga negativa del biochar y las cargas positivas del  $NH_4^+$  y el  $K^+$ . En el caso del  $PO_4^{-3}$  puede deberse al calcio presente en la estructura del biochar.

### **5.3 Conclusiones respecto al tercer objetivo**

La mezcla de fertilizante NPK con el biochar en una proporción másica 1:2 es la que presenta valores de  $t_{1/2 max}$  superiores a las otras formulaciones, mostrando una lixiviación de  $NH_4 - N$ ,  $PO_4 - P$  y  $K^+$  más lenta, por lo que se definió esta como la relación óptima para la formulación de las pastillas de fertilizante NPK/biochar.

#### **5.4 Conclusiones respecto al cuarto objetivo**

Se elaboró el diagrama de flujo del proceso de producción de las pastillas de fertilizante NPK/biochar 1:2 a escala laboratorio donde se determinaron como etapas principales la pirólisis y el empastillado.

En la pirólisis de los residuos de poda, se logró un rendimiento de producción de biochar del 30,81 %, siendo el restante los bioaceites y biogases generados en el proceso.

En el empastillado se logró un rendimiento del 94,43 %, donde las pérdidas se deben al agua evaporada y al material que queda adherido a la prensa manual.

Actualmente en el laboratorio del Instituto de Investigaciones Químicas se cuenta con un horno reactor capaz de tratar 135 g de residuos de poda, bajo estas condiciones y mediante la realización de balances de masa, se determinó que se pueden generar un total de 93 pastillas de fertilizante, obteniéndose un rendimiento total del proceso de 40,20 %.

#### **5.5 Conclusiones respecto al objetivo general**

El biochar es un material capaz de ser utilizado en la elaboración de fertilizantes de liberación lenta debido a propiedades como su área superficial, porosidad y presencia de grupos funcionales, brindándole una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes, además de brindar efectos positivos a las propiedades fisicoquímicas del suelo.

El fertilizante obtenido que es una mezcla de NPK (obtenido a partir de materias primas bolivianas como la urea, roca fosfórica y cloruro de potasio) y biochar en una relación másica 1:2 permite una liberación más lenta de nutrientes en comparación con el NPK, principalmente del  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{K}^+$ .

Este material puede ser aplicado en suelos que presenten problemas de acidez, baja salinidad, baja retención de agua y nutrientes, siendo una alternativa ambientalmente amigable al uso de fertilizantes tradicionales.

“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA  
A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”

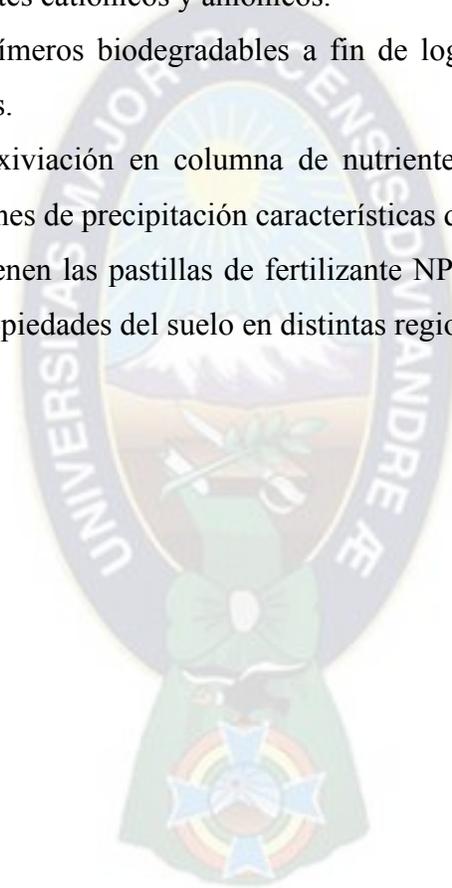
## 6. RECOMENDACIONES

Martínez Paredes Giancarla Ximena

**Tutor:** PhD. Luis G. López Nina

## 6. RECOMENDACIONES

- Investigar alternativas respecto al uso de maquinaria y aditivos necesarios para mejorar el proceso de empastillado de las mezclas de fertilizante NPK/biochar.
- Realizar un estudio técnico – económico para la producción de las pastillas de fertilizante NPK/biochar a una escala piloto.
- Analizar la modificación química del biochar de modo que se pueda mejorar la capacidad de adsorción de nutrientes catiónicos y aniónicos.
- Analizar el uso de polímeros biodegradables a fin de lograr una liberación más lenta y controlada de nutrientes.
- Realizar pruebas de lixiviación en columna de nutrientes con distintos tipos de suelo, simulando las condiciones de precipitación características de cada región.
- Probar el efecto que tienen las pastillas de fertilizante NPK/biochar en el rendimiento de los cultivos y en las propiedades del suelo en distintas regiones del país.



**“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA  
A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**

# **7. BIBLIOGRAFÍA**

Martínez Paredes Giancarla Ximena

**Tutor:** PhD. Luis G. López Nina

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Alkharabsheh, H. M., Seleiman, M. F., Battaglia, M. L., Shami, A., Jalal, R. S., Alhammad, B. A., Almutairi, K. F., & Al-Saif, A. M. (2021). Biochar and its broad impacts in soil quality and fertility, nutrient leaching and crop productivity: A review. *Agronomy*, *11*(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy11050993>
- American Public Health Association. (1992). *Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater* (18th ed.).
- Amurrio, D. D. (2004). Industrialización del Gas Natural : Fertilizantes y Polímeros. *Acta Nova*, *2*(4), 533. [http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v2n4/v2n4\\_a09.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v2n4/v2n4_a09.pdf)
- Anaya, A., & Pedroza, H. (2008). Scaling-up, the art of chemical engineering: Pilot plants, the step between the egg and the hen. *Ciencia Ed. (IMIQ)*, *23*(1), 31–39.
- APHA. (1992). American Public Health Association Method 3112: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *Methods for Examination of Water and Wastewater*, *552*, 7.
- Arévalo, G., & Castellano, M. (2009). *Manual de Fertilizantes y Enmiendas* (p. 57). Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria. Escuela Agrícola Panamericana.
- Asociación Internacional de la Industria de los Fertilizantes. (2002). *Los fertilizantes y su uso*.
- ASTM International. (2012). Standard Test Method for Carbon Black - Total and External Surface Area by Nitrogen Adsorption. Designation: D6556 – 10 Standard. *ASTM International*, *i*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/D6556-14.2>
- Bautista Cruz, A., Etchevers Barra, J., del Castillo, R. F., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, *2*(13), 90–97.
- Bellott, J. (1991). Eficiencia agronómica de la roca fosfórica en los suelos de Bolivia. *Revista Facultad de Agronomía*, *17*, 97–110.
- Bernabé Lang, J. (2020). *Estudio De Mercado De Fertilizantes En Bolivia*. <https://www.autoridadempresas.gob.bo/descargas?download=1033:estudio-de-mercado-de-fertilizantes-en-bolivia>
- Bhardwaj, A., Arya, G., Kumar, R., Hamed, L., Pirasteh-Anosheh, H., Jasrotia, P., Kashyap, P., & Singh, G. (2022). Switching to nanonutrients for sustaining agroecosystems and environment: the challenges and benefits in moving up from ionic to particle feeding. *Nanobiotechnology*, *20*(1). <https://doi.org/10.1186/s12951-021-01177-9>
- Bumanis, G., Vitola, L., Pundiene, I., & Sinka, M. (2020). *Gypsum , Geopolymers , and Starch — Alternative Binders for Bio-Based Building Materials : A Review and Life-Cycle Assessment*.
- Chen, L., Chen, Q., Rao, P., Yan, L., Shakib, A., & Shen, G. (2018). Formulating and optimizing a novel biochar-based fertilizer for simultaneous slow-release of nitrogen and immobilization of cadmium. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(8).

<https://doi.org/10.3390/su10082740>

- Cole Palmer Instrument Company. (n.d.). *Laboratory Ammonium Ion Electrode Instruction Manual* (pp. 1–19).
- Collard, F. X., Carrier, M., & Görgens, J. F. (2016). Fractionation of Lignocellulosic Material With Pyrolysis Processing. *Biomass Fractionation Technologies for a Lignocellulosic Feedstock Based Biorefinery*, 81–101. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802323-5.00004-9>
- Condori, M. (n.d.). *Planta NPK fabricará composiciones de fertilizantes que incrementan la productividad de cultivos*. Agencia Boliviana de Información. <https://www.abi.bo/index.php/component/content/article/36-notas/noticias/economia/24354-planta-npk-fabricara-composiciones-de-fertilizantes-que-incrementan-la-productividad-de-cultivos?Itemid=101>
- Deheza, P. (2022, July 1). Bolivia producirá fertilizantes NPK. *La Razón*. <https://www.la-razon.com/energias-negocios/2022/07/01/bolivia-producira-fertilizantes-npk/>
- Escalera, S. (2014). *Producción de fertilizantes NPK en Bolivia*. October, 1–5.
- Escalera, S. J. (2015). *Producción De Potasio En Bolivia*. 4. [https://www.researchgate.net/publication/304832440\\_PRODUCION\\_DE\\_POTASIO\\_EN\\_BOLIVIA](https://www.researchgate.net/publication/304832440_PRODUCION_DE_POTASIO_EN_BOLIVIA)
- Fertilab. (2016). *Interpretación de Resultados de Textura y Humedad del suelo* (pp. 1–4). <https://www.fertilab.com.mx/blog/150-interpretacion-de-resultados-de-textura-y-humedad-del-suelo/>
- Fertilab. (2021). *Propiedades físicoquímicas del suelo y el crecimiento de las plantas*. <https://www.fertilab.com.mx/blog/308-propiedades-fisicoquimicas-del-suelo-y-el-crecimiento-de-las-plantas/>
- Fertilab. (2023). *La Capacidad de Intercambio Catiónico del Suelo* (pp. 1–3). <https://www.fertilab.com.mx/blog/21-la-capacidad-de-intercambio-cationico-del-suelo/>
- Garrabrants, A., Kosson, D., van der Sloot, H., Sanchez, F., & Hjelmar, O. (2010). *Background Information for the Leaching Environmental Assessment Framework (LEAF) Test Methods*. U.S. Environmental Protection Agency.
- Geng, N., Kang, X., Yan, X., Yin, N., Wang, H., Pan, H., Yan, Q., Lou, Y., & Zhuge, Y. (2022). Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 232. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113241>.
- Gwenzi, W., Nyambishi, T. J., Chaukura, N., & Mapope, N. (2018). Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N–P–K slow-release fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(2), 405–414. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1399-7>
- Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J. G., Chel-Guerrero, L., & Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización físicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán,

- México. *Ciencia e Tecnología de Alimentos*, 28(3), 718–726. <https://doi.org/10.1590/s0101-20612008000300031>
- INIAF, ANAPO, & CIAB. (2019). *Plan nacional de fertilización y nutrición vegetal 2019 - 2025* (pp. 1–60).
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2015). *Producción Y Mercado de la Quinoa en Bolivia* (J. Risi, W. Rojas, & M. Pacheco (eds.)). <http://repiica.iica.int/docs/b3763e/b3763e.pdf>
- International Plant Nutrition Institute. (2010). *Phosphorous Fertilizer Production and Technology* (pp. 1–36).
- Jamnonkan, T., & Kaewpirom, S. (2010). Potassium Release Kinetics and Water Retention of Controlled-Release Fertilizers Based on Chitosan Hydrogels. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(3), 413–421. <https://doi.org/10.1007/s10924-010-0228-6>
- Junsatien, W., Soponpongpiat, N., & Phestsong, S. (2013). *Torrefaction reactors*. 32(1), 84–91.
- Kim, P., Hensley, D., & Labbé, N. (2014). Nutrient release from switchgrass-derived biochar pellets embedded with fertilizers. *Geoderma*, 232–234, 341–351. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.017>
- Kirk, G. J. D., & Nye, P. H. (1991). A model of ammonia volatilization from applied urea. V. The effects of steady-state drainage and evaporation. *Journal of Soil Science*, 42(1), 103–113. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1991.tb00095.x>
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M. N., Saleem, M., & Rehman, S. ur. (2019). Synthesis and characterization of environmental friendly corncob biochar based nano-composite – A potential slow release nano-fertilizer for sustainable agriculture. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 11, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100212>
- Lawrencia, D., Wong, S. K., Low, D. Y. S., Goh, B. H., Goh, J. K., Ruktanonchai, U. R., Soottitantawat, A., Lee, L. H., & Tang, S. Y. (2021). Controlled release fertilizers: A review on coating materials and mechanism of release. *Plants*, 10(2), 1–26. <https://doi.org/10.3390/plants10020238>
- Li, S., & Chen, G. (2020). Contemporary strategies for enhancing nitrogen retention and mitigating nitrous oxide emission in agricultural soils: present and future. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 22, Issue 4). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00327-2>
- Li, Y., & Ren, S. (2011). Basic Properties of Building Decorative Materials. In *Building Decorative Materials: Vol. i* (pp. 10–24). <https://doi.org/10.1533/9780857092588.10>
- Limachi, D. (2018). *Evaluación de la Capacidad de Uso de la Tierra de tres Municipios Circundantes al Lago Titicaca*. 127.
- Lopez, L., Valdez, S., Cabrera, S., Martínez, G., Surculento, R., Lara, R., Velasco, J., Torres, G., Tirado, N., & Zambrana, S. (2021). *Conversión de residuos domiciliarios de*

*bioseguridad y residuos de posa en productos útiles: biochar y carbón activado.*  
Universidad Mayor de San Andres.

- Marsh, M., Keena, M., & Scherer, T. (2020). *Eutrophication (algal blooms) in Big A fish kill in North Dakota. Environmental Implications of Excess Fertilizer and Manure on Water Quality.* 1281(August). [www.ag.ndsu.edu/agcomm/creative-commons](http://www.ag.ndsu.edu/agcomm/creative-commons).
- Mita Quisbert, V. F., & Hervé, D. (2021). Diagnóstico de la fertilidad del suelo y análisis de la introducción de la mecanización agrícola en las familias Uru Chipayas. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 8(3), 31–44. <https://doi.org/10.53287/fkfb8438dz68f>
- Mowrer, J. (1995). *Nitrification in Sandy Soils of the Atlantic Coastal Plain and Its Relationship to the Development of Subsoil Acidity.* University of Georgia.
- Navarro García, G., & Navarro García, S. (2014). *Fertilizantes química y acción* (Mundi Prensa (ed.); Primera).
- Navarro García, G., & Navarro García, S. (2023). *Fertilizantes Química y Acción* (Segunda ed).
- Navas Alvarado, J. (2009). *Eficiencia agronómica de la roca fosfórica en suelos de Colombia.* 4 p. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/32040>
- Novoa, R., Gonzáles, S., & Opazo, G. (n.d.). *Buenas prácticas de manejo de fertilizantes.*
- Pogorzelski, D., Filho, J. F. L., Matias, P. C., Santos, W. O., Vergütz, L., & Melo, L. C. A. (2020). Biochar as composite of phosphate fertilizer: Characterization and agronomic effectiveness. *Science of the Total Environment*, 743, 140604. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140604>
- Premalatha, R. P., Poorna Bindu, J., Nivetha, E., Malarvizhi, P., Manorama, K., Parameswari, E., & Davamani, V. (2023). A review on biochar's effect on soil properties and crop growth. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1092637>
- Purnomo, C. W., & Saputra, H. (2021). Manufacturing of slow and controlled release fertilizer. In *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture.* Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819555-0.00006-6>
- Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361(October), 114055. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>
- Rehrah, D., Reddy, M. R., Novak, J. M., Bansode, R. R., Schimmel, K. A., Yu, J., Watts, D. W., & Ahmedna, M. (2014). Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 108(November 2017), 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.03.008>
- Rens, H., Bera, T., & Alva, A. K. (2018). Effects of Biochar and Biosolid on Adsorption of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium in Two Soils. *Water, Air, and Soil Pollution*,

229(8). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3925-8>

Salm, H., & Castro, J. (2005). Propiedades químicas y potencial productivo de los suelos del departamento de La Paz, Bolivia. *Revista Boliviana de Química*, 22, 19–26.

Sánchez V, J. (n.d.). *Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas*.

Shi, W., Ju, Y., Bian, R., Li, L., Joseph, S., Mitchell, D. R. G., Munroe, P., Taherymoosavi, S., & Pan, G. (2020). Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching. *Science of the Total Environment*, 701, 134424. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134424>

Shin, J. Du, & Park, S. W. (2018). Optimization of blended biochar pellet by the use of nutrient releasing model. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/app8112274>

Sim, D. H. H., Tan, I. A. W., Lim, L. L. P., & Hameed, B. H. (2021). Encapsulated biochar-based sustained release fertilizer for precision agriculture: A review. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127018>

Singh, B., Dolk, M. M., Shen, Q., & Camps-Arbestain, M. (2017). Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. *Biochar: A Guide to Analytical Methods, June 2018*, 23–38. <https://ebooks.publish.csiro.au/content/ISBN/9781486305100>

Soto, A. (2000). *Obtención de Fertilizantes Fosfatados (S.F.T) a partir de Roca Fosfórica Importada y Ácido Sulfúrico Nacional, Anteproyecto de una Factibilidad Técnico - Económica*. Universidad de Chile.

South Dakota Soil Health Coalition. (2023). *Soil Electrical Conductivity*. <https://www.sdsoilhealthcoalition.org/technical-resources/chemical-properties/soil-electrical-conductivity/>

Sumbogo Murti, S., Finalis, E. R., Noor, I., Suratno, H., Rosyadi, E., Saputra, H., & Noda, R. (2020). Development of Carbon Based NPK Slow Release Fertilizer using Biochar from Oil Palm Empty Fruits Bunch. *Indonesian Journal of Energy*, 3(1), 19–24.

Tangara, E. (2011). Efecto de fertilizantes organicos e inorganicos en las propiedades fisicas y quimicas del suelo sobre el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) en tres comunidades del altiplano central de Bolivia. In *Biomédica* (Vol. 31, Issue sup3.2). Universidad Mayor de San Andres.

USDA. (2012). *National Soil Survey Handbook*.

Veksha, A., McLaughlin, H., Layzell, D. B., & Hill, J. M. (2014). Pyrolysis of wood to biochar: Increasing yield while maintaining microporosity. *Bioresource Technology*, 153, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.082>

Villalobos, G. (2022). *Insumos agrícolas: ¿Una nueva industria nacional de fertilizantes y agroquímicos?* <https://fundacionsolon.org/2022/04/13/insumos-agricolas-una-nueva-industria-nacional-de-fertilizantes-y-agroquimicos/>

Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review.

*Environmental Science and Ecotechnology*, 10, 100167.  
<https://doi.org/10.1016/J.ESE.2022.100167>

- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570.  
<https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., & Zimmerman, A. R. (2012). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, 89(11), 1467–1471.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002>
- YPFB. (2017). *Bolivia inicia la industrialización del gas*. <https://www.ypfb.gob.bo/es/urea>
- Zaman, C. Z., Pal, K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marliana, E., Rafique, R. F., & Johan, R. Bin. (2017). Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. *Pyrolysis*, 3–36. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69036>
- Zheng, J., Han, J., Liu, Z., Xia, W., Zhang, X., Li, L., Liu, X., Bian, R., Cheng, K., Zheng, J., & Pan, G. (2017). Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 241, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.034>

**“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA  
A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”**

## **8. ANEXOS**

Martínez Paredes Giancarla Ximena

**Tutor:** PhD. Luis G. López Nina

## 8. ANEXOS

### ANEXO A

En este apartado se muestran las fichas técnicas y reportes que indican la pureza de las materias primas empleadas para la elaboración del fertilizante NPK.

 **UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN**  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
LABORATORIO DE SERVICIOS

INFORME DE ENSAYO QUÍMICO

INTERESADO: JATA S.R.L. Certif. No.: 41/23

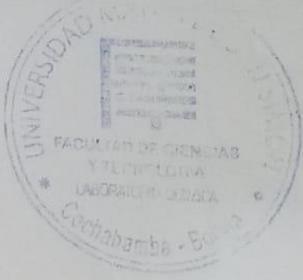
ANÁLISIS DE: Una muestra de ROCA FOSFÓRICA MOLIDA entregada en el Laboratorio del Departamento de Química por el interesado.

RESULTADO

PARÁMETRO	MÉTODO	RESULTADO
Pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ )	Espectrofotométrico	28,85 %

Cochabamba, 6 de marzo de 2023.

  
Lic. Rosse Mary Terán P.  
JEFA LABORATORIO DE SERVICIOS



*Ciencia y Conocimiento  
DESDE 1832*

Versión: 1

YLB-K-FTE-01



**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS**  
**DATOS TÉCNICOS BÁSICOS**

Nombre Químico:	Cloruro de Potasio
Otros Denominaciones:	Sales de Potasa, Muriato de Potasa
Categoría	Fertilizantes
Familia	Potásicos
Presentación	Sólido en forma de cristales en bolsas de 50 kg y/o maxisacos de 1000 kg
Formula de	N - P - K <b>0 - 0 - 62.35</b>
Relación	Mg - S - Ca <b>0.48 - 4.94 - 0</b>

**DETALLE DE PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS**

Potasio Total K <sub>2</sub> O (K)	≥ 60 - 62.35 % Oxido de Potasio (w/w)
Magnesio (Mg)	≤ 0.48
Sodio (Na)	≤ 1.15 %
Azufre (S)	0.05 - 4.94
Como ion sulfato (SO <sub>4</sub> )	0.15 - 14.81
Humedad	≤ 1 %
Granulometría	≤ 2,00 mm
Solubilidad [g/100g]	32,0 - 34,2
pH en solución al 10%	5,3 - 8,8
Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	1,93 - 2,30
Sólidos Insolubles	≤ 0,1 %

**CARACTERÍSTICAS ORGANOLEPTICAS**

Color	Variabilidad acorde a escala desde el 1 al 3 [*]
Sabor	Fuerte gusto salino
Aspecto	Sólido en forma de cristales
Olor	Inodoro

**USOS IDENTIFICADOS:**

Los fertilizantes presentan nutrientes que son asimilados por las plantas, estos se adicionan al suelo para mantener, suplir e incrementar determinados elementos esenciales necesarios para la nutrición y crecimiento de las plantas.

El potasio (K) es un nutriente esencial junto al fósforo (P) y el nitrógeno (N) siendo nutrientes primarios. El Azufre (S), Magnesio (Mg) y Calcio (Ca) son nutrientes secundarios aplicados en todo cultivo.

El K<sup>+</sup> se absorbe de forma iónica por las raíces. En la planta no forma compuestos orgánicos. Es fundamental para la síntesis de proteínas, ayuda a regular el balance hídrico e iónico. Mejora la resistencia a enfermedades de las plantas y ayuda a tolerar periodos de sequía. Mejora la calidad del fruto entregando aroma, color y ayuda soportar la adversidad del tiempo climático.

Uso contraindicado para el cultivo de tabaco y para aquellos sensibles al cloro.

**LUGAR DE ELABORACIÓN**

Producto obtenido en la Planta Industrial de Sales de Potasio de Yacimientos de Litio Bolivianos  
Salar de Uyuni - Potosí (Bolivia)

Oficina Comercial: Edif. Hansa Piso 19, La Paz  
Teléfonos de contacto: 591-2-145711 y 2-315520

**[\*] ESCALA DE GRADIENTE DE LA DECOLORACIÓN DEL MARRÓN**



# UREA (46 – 0 – 0)

FERTILIZANTE NITROGENADO CON MAYOR CONTENIDO DE NITRÓGENO



PÁRAMETROS TÉCNICO		
PARÁMETROS	UNIDADES	CONTENIDO
Nitrógeno	% mínimo	46%
Humedad	% máximo	0,45%
Biuret	% máximo	1%
Formaldehido	% máximo	0,55%
Amoniaco libre	ppm máximo	100ppm
Tamaño	mm	>90% entre 2 a 4 mm



## CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO

La UREA producida por YPFB ha sido reconocida por su calidad por productores locales e internacionales.

## DOSIS Y EPOCAS DE APLICACIÓN

La Urea puede ser aplicado en dos etapas del Cultivo:

- Primera aplicación a la siembra (es recomendable colocar el 50 % de la dosis recomendada en esta etapa).
- Segunda aplicación al aporque (completando el 50 % restante de la dosis recomendad).

“OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA A PARTIR DE  
BIOCHAR MODIFICADO CON NPK”

MARTÍNEZ PAREDES GIANCARLA XIMENA  
[martinez.8260989@gmail.com](mailto:martinez.8260989@gmail.com)  
+591 60139900



ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

MINISTERIO DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y ECONOMIA PLURAL



2023-TTES-2006-D-2

DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-4178/2023
La Paz, 29 de Noviembre del 2023

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha 22 de Noviembre del 2023, por GIANCARLA XIMENA MARTINEZ PAREDES con C.I. N° 8260989 LP, con número de trámite DA 2287/2023, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma descentralizada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios".



"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

Oficina Central - La Paz
Av. Morúa, N° 151,
entre Dos, Uruguay y
L. Saldías Alvarado.
Telf.: 2209397
senapi - senapi

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
perimetral izquierda,
N° 10, Edif. Bicentenario.
Telf.: 309521 - 309522

Oficina - Cochabamba
Calle Bolivia, N° 12,
entre el de Julio y Arica.
Telf.: 309501 - 309502

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2010
SSE, Multicentro O Centro
Calle. Pico 2, Of. 18.
Zona El de Julio.
Telf.: 220939 - 220939

Oficina - Ortopneumona
Calle Alcantara 2, N° 101
calle 101, Ortopneumona,
Zona Parque Bolivia.
Telf.: 2209397

Oficina - Suiza
Av. La Paz, 1000
Calle Los Niños y Avenida
Telf.: 2209398, N° 101.
Telf.: 2209398

Oficina - Tarija
Calle 6 de Octubre N° 1270
entre República y Tarija,
Salvata Central, Of. 10.
Telf.: 2209398

Oficina - Potosí
Av. Wladimir Estroza
Wladimir Estroza y San Alberto,
Edif. AM, Salinas N° 201.
Primer Piso, Of. 10.
Telf.: 2209398

www.senapi.gob.bo

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley Nº 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial".

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.


**POR TANTO**

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

**RESUELVE:**

**INSCRIBIR** en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: "**OBTENCIÓN DE UN FERTILIZANTE DE LIBERACIÓN LENTA A PARTIR DE BIOCHAR MODIFICADO CON NPK**", a favor de la autora y titular: **GIANCARLA XIMENA MARTINEZ PAREDES** con C.I. Nº **8260989 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

  
Abg. Roberto Rich García Herrera  
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR  
Y DERECHOS CONEXOS a.i.  
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



SENAPI  
S.A.S.



"2023 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO"

Oficina Central - La Paz  
Av. Potosí, N° 375,  
entre las, Urugua y  
C. Bañados Miraflores.  
Telf.: 2200200  
2200201 - 2200202

Oficina - Santa Cruz  
Av. Urugua, Calle  
promocional Bañados,  
N° 20, SdE. Miraflores.  
Telf.: 2200201 - 2200202

Oficina - Cochabamba  
Calle Bolivia, N° 211,  
entre la de Julio y Andino.  
Telf.: 2200201 - 2200202

Oficina - El Alto  
Av. Juan Pablo II, N° 2000  
SdE. Miraflores El Collao  
Telf.: 2200201 - 2200202  
Calle de la Paz,  
Telf.: 2200201 - 2200202

Oficina - Ortopedica  
Calle Kilómetro 2, N° 300  
caso con, Miraflores,  
Calle Parque Bolivia,  
Telf.: 2200201 - 2200202

Oficina - Tarija  
Av. la Paz, entre  
Calle Ciro Trigo y Avenida  
SdE. Santa Cruz, N° 303,  
Telf.: 2200201 - 2200202

Oficina - Oruro  
Calle 6 de Octubre N° 100  
entre Apachachi y Surco,  
Calle Central, N° 10,  
Telf.: 2200201 - 2200202

Oficina - Potosí  
Av. Villalba entre calles  
Miraflores Alto y San Alberto,  
SdE. Av. Bolivia N° 303,  
Entre Potosí, N° 12,  
Telf.: 2200201 - 2200202

[www.senapi.gob.bo](http://www.senapi.gob.bo)