

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Desarrollo de fertilizantes de liberación lenta basados en zeolitas para mejorar la
eficiencia agronómica

INGE-2415

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Materiales

Presentado por:

Yariel Omar Gamboa Rodas

Luis Eduardo Rojas Campuzano

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo primeramente a Dios por permitirme culminar mis estudios universitarios. A mi madre, María, quien me ha inspirado y animado a no desistir durante estos años. A mis hermanas, padre, abuela y mentor, por motivarme y brindarme su ayuda. Lo dedico a mis amigos, con quienes he trabajado para avanzar en la vida, y a los profesores de ESPOL, con los quienes he compartido y me han ayudado a crecer.

Dedico este proyecto a mis padres, Wilson y Pilar, por su apoyo incondicional y sacrificio en cada etapa de mi carrera universitaria. A mis hermanos, Paul, Javier y María Gabriela, por sus consejos, ayuda y constante apoyo. A mis abuelos, Wilson y Flor, por inspirarme y mostrarme lo apasionante y fundamental que son los conocimientos de mi carrera. No menos importante, a mis amigos, quienes han sido excelentes compañeros y han enriquecido esta hermosa experiencia.

Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento al M.Phil. David Reyes, por guiarnos a lo largo de nuestra carrera y por exigirnos siempre un trabajo de calidad. También al Ph.D. Mauricio Cornejo por permitirnos trabajar en este tema tan interesante y por su constante ayuda en la elaboración del proyecto. A los encargados y técnicos de los diversos laboratorios donde llevamos a cabo la metodología. Por último, a cada profesor, tutor y compañero que han contribuido a nuestra formación profesional de forma directa o indirecta.

Declaración Expresa

Nosotros Yariel Omar Gamboa Rodas y Luis Eduardo Rojas Campuzano acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 20 de mayo del 2024.



Yariel Omar
Gamboa Rodas



Luis Eduardo
Rojas Campuzano

Evaluadores

David Reyes Ortiz, M.Phil

Profesor de Materia

Mauricio Cornejo Martínez, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

El uso excesivo de fertilizantes convencionales provoca lixiviación de nutrientes, contaminación del agua y pérdida de fertilidad del suelo. Por ello, para mejorar la eficiencia agronómica y reducir el impacto ambiental, se desarrollaron 27 muestras de fertilizantes de liberación lenta a base de zeolita, urea, nitrato de potasio y roca fosfórica (cada una con distinta composición). Se realizaron pruebas de laboratorio, incluyendo análisis de sólidos disueltos (TDS), conductividad eléctrica (CE), capacidad higroscópica, peso volumétrico y caracterización mediante SEM-EDS. De estas, se seleccionaron 3 muestras: la de mayor, mediana y baja liberación para un estudio más detallado.

Las muestras con mayor contenido de zeolita y roca fosfórica mostraron una liberación controlada de nutrientes, mientras que las ricas en nitrato de potasio liberaron nutrientes más rápidamente. Las muestras elaboradas obtuvieron una capacidad higroscópica elevada debido a la interacción de la urea con la zeolita y su morfología porosa. Además, los fertilizantes elaborados mostraron un peso volumétrico comparable a los fertilizantes comerciales, indicando gran disponibilidad de nutrientes por unidad de volumen.

Se concluye que la muestra #27 (40% zeolita, 20% urea, 20% nitrato de potasio y 20% roca fosfórica) fue la más destacada y apta para futuras investigaciones.

Palabras clave: liberación sostenida de nutrientes, comportamiento de liberación de nutrientes, capacidad higroscópica, peso volumétrico.

Abstract

The excessive use of conventional fertilizers leads to nutrient leaching, water contamination, and soil fertility loss. To improve agronomic efficiency and reduce environmental impact, 27 slow-release fertilizer samples were developed using zeolite, urea, potassium nitrate, and phosphate rock, each with different compositions. Laboratory tests were conducted, including total dissolved solids (TDS) analysis, electrical conductivity (EC), hygroscopic capacity, bulk density, and SEM-EDS characterization. From these, samples with high, medium, and low release rates were selected for more detailed study.

Samples with higher zeolite and phosphate rock content showed controlled nutrient release, while those rich in potassium nitrate released nutrients more rapidly. The samples demonstrated high hygroscopic capacity due to the interaction between urea and zeolite, along with their porous morphology. Additionally, the fertilizers showed bulk density comparable to commercial fertilizers, indicating a high nutrient availability per unit volume. Sample #27 (40% zeolite, 20% urea, 20% potassium nitrate, and 20% phosphate rock) was the most promising and suitable for further research.

Keywords: *sustained nutrient release, nutrient release behavior, hygroscopic capacity, bulk density.*

Índice General

Resumen	I
Abstract	II
Índice General	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas.....	IX
Capítulo 1	1
1. Introducción.....	2
1.1. Descripción del Problema.....	3
1.2. Justificación del Problema.....	4
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Marco teórico.....	5
1.4.1. Las zeolitas	5
1.4.1.1 Estructura cristalina.....	5
1.4.1.2. Capacidad de interacción.....	6
1.4.1.3. Relación con la agricultura.....	6
1.4.2. Tipos de fertilizante.....	7
1.4.2.1. Fertilizantes de liberación rápida.....	7
1.4.2.2. Fertilizantes de liberación lenta.....	7
1.4.2.3. Fertilizantes NPK y NPK-CD.	7
1.4.2.4. Fertilizantes de liberación lenta a base de zeolita.	7

Capítulo 2	10
2. Metodología.....	11
2.1. Preparación de muestras	11
2.1.1. Composiciones de las muestras.....	11
2.1.2. Elaboración de pastillas.....	13
2.2. Selección de mezclas por capacidad de liberación de nutrientes	16
2.3. Ensayos realizados.....	16
2.3.1. Total de sólidos disueltos (TDS) y conductividad eléctrica (CE).....	16
2.3.1.1. Análisis de componentes principales (PCA).	18
2.3.1.2. Comportamiento de liberación.	19
2.3.2. Capacidad higroscópica.....	19
2.3.3. Peso volumétrico	19
2.3.4. Caracterización SEM.....	20
2.4. Criterios de evaluación para matriz de decisión	21
2.5. Comparación de los fertilizantes desarrollados con fertilizantes comerciales	22
Capítulo 3	23
3. Resultados y análisis.....	24
3.1. Selección de mezclas	24
3.2. Ensayos realizados.....	24
3.2.1. Total de sólidos disueltos (TDS) y conductividad eléctrica (CE).....	25
3.2.1.1. Análisis de correlación entre los componentes y los resultados.	25
3.2.1.2. Comparación entre las mezclas desarrolladas y las comerciales.	28
3.2.1.3. Comportamiento de liberación de nutrientes.....	30
3.2.2. Capacidad higroscópica.....	32
3.2.3. Peso volumétrico	35
3.2.4. Caracterización SEM.....	36
3.2.4.1. Zeolita.....	36

3.2.4.2. Muestra #2.....	38
3.2.4.3. Muestra #20.....	39
3.2.4.4. Muestra #27.....	40
3.2.4.5. F1.....	41
3.2.4.6. F2.....	42
3.2.4.7. F3.....	43
3.3. Selección de muestra con mayor potencial.....	44
3.4. Análisis económico.....	45
3.4.1. Costos operativos	46
3.4.2. Análisis VAN-TIR	47
3.4.3. Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)	48
Capítulo 4.....	49
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	50
4.1. Conclusiones.....	50
4.2. Recomendaciones	52
APÉNDICES.....	58
Apéndice A.....	58
Apéndice B.....	60
Apéndice C.....	62
Apéndice D.....	67
Apéndice E.....	69

Abreviaturas

NPK	Nitrógeno, Fósforo y Potasio
NPK-CD	Nitrógeno, Fósforo y Potasio de composiciones diferentes
SEM-EDS	Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Dispersión de Energía
TDS	Total de Sólidos Disueltos
CE	Conductividad Eléctrica
PCA	Análisis de Componentes Principales
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
PRI	Periodo de Retorno de la Inversión

Simbología

N	Nitrógeno
P	Fósforo
K	Potasio
Al	Aluminio
Si	Silicio
Ca	Calcio
O	Oxígeno
Na⁺	Ion de Sodio
K⁺	Ion de Potasio
AlO₄	Alúmina
SiO₄	Sílice
nm	Nanómetros
μs/cm	Microsiemens por centímetro
g	Gramos
ml	Mililitros
g/ml	Gramos por mililitro
p/p	Porcentaje peso
mm	Milímetros
ppm	Partes por millón
ρ	Densidad

Índice de Figuras

Figura 1.1	6
Figura 2.1	12
Figura 2.2.	13
Figura 2.3	15
Figura 2.4	15
Figura 2.5	17
Figura 2.6	20
Figura 3.1	25
Figura 3.2	26
Figura 3.3.	28
Figura 3.4	29
Figura 3.5	30
Figura 3.6	31
Figura 3.7	38
Figura 3.8	39
Figura 3.9	40
Figura 3.10	41
Figura 3.11	42
Figura 3.12	43
Figura 3.13	43

Índice de Tablas

Tabla 2.1.....	14
Tabla 2.2.....	21
Tabla 2.3.....	22
Tabla 3.1.....	24
Tabla 3.2.....	33
Tabla 3.3.....	35
Tabla 3.4.....	36
Tabla 3.5.....	45
Tabla 3.6.....	46
Tabla 3.7.....	47
Tabla 3.8.....	48

Capítulo 1

1. Introducción

Desde los cimientos de la civilización, la agricultura ha sido una pieza fundamental en la historia, y las prácticas de esta rama han evolucionado junto con la sociedad. El aumento de la población mundial ha causado que la demanda de alimentos crezca exponencialmente cada año, provocando mayores gastos en la agricultura y una exigencia en la calidad de los productos. Sin embargo, la sobreproducción en el campo agrícola obliga a muchas empresas a asegurar la calidad de los cultivos sin incurrir en grandes pérdidas económicas, lo que representa un reto significativo [1], [2].

El uso de fertilizantes químicos convencionales, como la urea y el NPK (compuesto de nitrógeno, fósforo y potasio), ha sido una solución común para proporcionar nutrientes esenciales al suelo. No obstante, estos fertilizantes presentan problemas considerables, como la lixiviación de nutrientes, la volatilización y la contaminación ambiental. La aplicación excesiva de fertilizantes también afecta negativamente la calidad del suelo, disminuyendo su fertilidad a largo plazo [3]. Esta situación exige soluciones más eficientes y sostenibles para el manejo de nutrientes en la agricultura.

Una alternativa es el uso de fertilizantes de liberación lenta, diseñados para suministrar nutrientes de manera gradual y controlada en el tiempo. Estos fertilizantes pueden mejorar la eficiencia del uso de nutrientes, reducir la lixiviación y la volatilización, y minimizar el impacto ambiental. Además, la liberación constante de nutrientes puede mejorar la salud del suelo y aumentar la productividad de los cultivos [2], [3].

Para optimizar su uso, los fertilizantes de liberación lenta deben incorporar materiales que faciliten una liberación controlada de nutrientes, como la zeolita. La zeolita es un mineral poroso con una alta capacidad de intercambio iónico y retención de agua, lo que la hace ideal para encapsular nutrientes y liberarlos lentamente. Su estructura porosa permite la liberación

gradual de potasio, amonio y fosfatos, adaptándose a las necesidades nutricionales de las plantas a lo largo de su ciclo de crecimiento [1], [3].

Realizar fertilizantes de liberación lenta a base de zeolita es una novedad prometedora en la agricultura moderna. Estos fertilizantes no solo ofrecen una solución eficiente y sostenible para la gestión de nutrientes, sino que también promueven la conservación del medio ambiente y mejoran la rentabilidad agrícola a largo plazo. Su desarrollo y adopción pueden marcar una diferencia significativa en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad global [3].

1.1. Descripción del problema

El cultivo de alimentos depende en gran medida de la aplicación de fertilizantes para suplir los nutrientes que el suelo agotado no puede proporcionar. Sin embargo, el uso excesivo de fertilizantes comunes, como la urea y el NPK, plantea desafíos significativos. Estos fertilizantes, aunque ricos en nutrientes esenciales, son perjudiciales para el medio ambiente debido a su contribución a la contaminación del suelo y la emisión de gases de efecto invernadero. Además, los altos costos de estos fertilizantes limitan la rentabilidad y la sostenibilidad de la agricultura [2].

Uno de los principales problemas con los fertilizantes convencionales es su liberación de nutrientes de manera instantánea y no controlada. Esto conduce a una nutrición irregular de las plantas y puede resultar en un uso ineficiente de los nutrientes, afectando negativamente el rendimiento de los cultivos. La falta de un suministro continuo y equilibrado de nutrientes durante todo el ciclo de crecimiento de las plantas puede impactar la productividad y la calidad de los cultivos [1].

Una empresa ecuatoriana dedicada al procesamiento y comercialización de minerales naturales no metálicos propone el desarrollo de un fertilizante de liberación lenta basado en zeolita, el cual ofrece una liberación gradual y controlada de nutrientes a lo largo del tiempo. Esto garantizaría una nutrición constante y adecuada para las plantas, independientemente de las

condiciones del suelo o del clima. Además, su uso puede conducir a una mayor eficiencia en el uso de nutrientes, reduciendo así los costos e impactos ambientales asociados con la fertilización convencional [4].

1.2. Justificación del problema

El desarrollo de un fertilizante de liberación lenta a base de zeolita es esencial para abordar los desafíos económicos y ambientales en la agricultura actual. Puede ahorrar unos 12 dólares por semana por acre en comparación con los fertilizantes estándar [5]. Esto no solo beneficiaría a los agricultores individualmente, sino que también contribuye a la seguridad alimentaria global al aumentar la producción agrícola.

En un aspecto ambiental, estos fertilizantes permiten una liberación gradual y controlada de nutrientes, lo que reduce el riesgo de contaminación del suelo y el agua. Al proporcionar una nutrición constante a las plantas a lo largo del ciclo de crecimiento, se minimiza la pérdida de nutrientes por lixiviación y volatilización, lo que contribuye a la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente [3], [4]. Esta práctica agrícola más sostenible puede ayudar a mitigar los impactos negativos de la agricultura en los ecosistemas locales y globales, promoviendo así la salud ambiental y la biodiversidad.

1.3. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos del proyecto.

1.3.1. Objetivo general

Diseñar un fertilizante de liberación lenta a base de zeolita mediante síntesis química y caracterización fisicoquímica para evaluar su capacidad de liberación de nutrientes y su contribución a la sostenibilidad ambiental y agronómica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar la estructura, morfología y composición química de la materia prima y del producto final utilizando técnicas de caracterización fisicoquímica para conocer qué cualidades influyen en el desempeño del producto.
- Comparar la capacidad de liberación de nutrientes entre el fertilizante con zeolita y fertilizantes convencionales mediante métodos electroquímicos para el análisis de la influencia de la zeolita en las muestras.

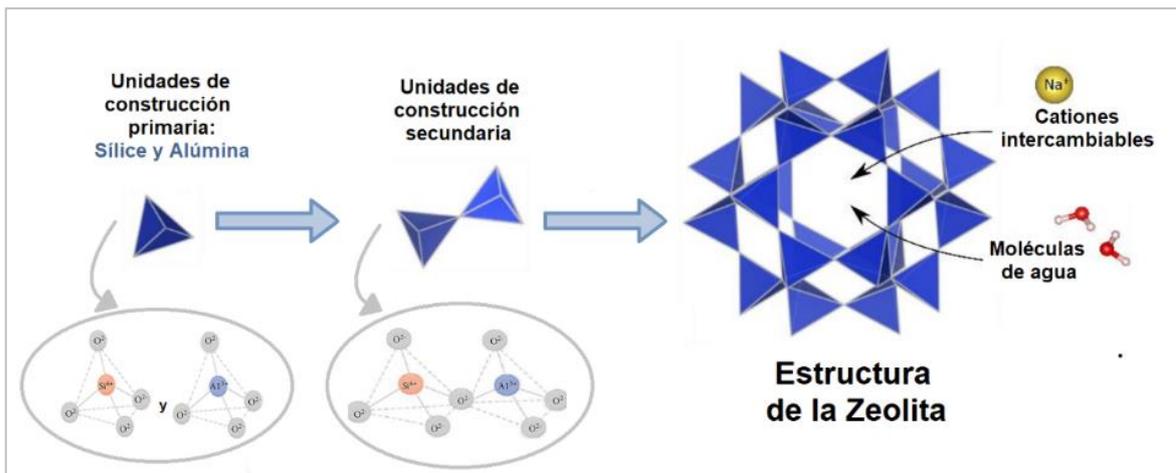
1.4. Marco teórico

El conocer qué son las zeolitas, su estructura y su relación con los fertilizantes es importante para comprender el impacto de este proyecto y su importancia.

1.4.1. Las zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados con una alta cristalinidad, compuestos por tetraedros de alúmina (AlO_4) y sílice (SiO_4) entrelazados. Poseen una estructura cristalina tridimensional con cavidades que permiten el movimiento de moléculas pequeñas, y en su composición suelen aparecer metales alcalinos o alcalinotérreos como el potasio, sodio o magnesio [6]. Las zeolitas de origen natural se forman a partir de procesos hidrotermales, especialmente volcánicos, y se encuentran cristalizadas en rocas ígneas y sedimentarias [7].

1.4.1.1 Estructura cristalina. Las zeolitas pueden presentar diversas configuraciones cristalinas [6]. Al deshidratarse, forman poros abiertos de manera muy ordenada [8]. La Figura 1.1 muestra un esquema de la estructura de la zeolita, la cual se forma por la unión sucesiva de sus unidades de construcción primaria: la sílice y la alúmina. La estructura, debido a sus poros, tiene la facilidad de capturar iones, moléculas de agua y oxígeno; proporcionando gran libertad de movimiento que permite el intercambio iónico y la deshidratación reversible [7], [9]. La cantidad de cationes intercambiables en la estructura disminuye cuando aumenta la relación Si/Al [6], [8].

Figura 1.1*Esquema de la estructura de zeolita*

Nota. Tomado de A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites Derbe et al., 2021; y Natural vs. Synthetic Zeolites por Król, 2020 [7], [10].

1.4.1.2. Capacidad de interacción. Cuando las zeolitas tienen un alto contenido de alúmina, tienen una facilidad de interacción con moléculas polares como el agua (hidrofílicas); mientras que, cuando tienen alto contenido de sílice, son más adecuadas para moléculas no polares (hidrofóbicas) [8].

1.4.1.3. Relación con la agricultura. Estas propiedades pueden ser directamente aplicadas en el campo de la agricultura, pues se conoce que, para mejorar la eficiencia de los cultivos y la recepción de nutrientes en las plantas, el fertilizante debe ser liberado en la rizósfera gradualmente a medida que las raíces van creciendo [11]. Este es un inconveniente significativo para los fertilizantes comunes, ya que, al ser aplicados en el suelo, no permiten un control continuo de los aportes nutritivos a la planta durante su crecimiento. En lugar de eso, solo proporcionan nutrientes en el periodo de aplicación inicial, lo que puede resultar en una nutrición inconsistente para las plantas a lo largo de su desarrollo.

1.4.2 Tipos de fertilizante

Cualquier tipo de fertilizante debe aportar nutrientes al suelo para el crecimiento del cultivo, estos nutrientes son ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. A continuación, se resaltarán las características de los fertilizantes de liberación rápida y lenta respectivamente, también se establecerán las diferencias entre un fertilizante NPK y un NPK-CD.

1.4.2.1. Fertilizantes de liberación rápida. Son altas fuentes de nitrógeno como la urea (en la mayoría de los casos). Su aplicación puede resultar en una absorción rápida de nutrientes por parte del suelo, pero también en pérdidas significativas por lixiviación si las plantas no los absorben de inmediato [12].

1.4.2.2. Fertilizantes de liberación lenta. Abordan el problema de los fertilizantes de liberación rápida mediante la liberación de sus nutrientes de manera regulada durante varias semanas. La razón por la que este tipo de fertilizante obtiene su capacidad de liberación lenta se debe al mecanismo de retardo, que puede ser un recubrimiento de polímeros, azufre, resinas termosellantes o alguna encapsulación que se degrada con el tiempo, permitiendo la liberación de nutrientes o matrices de liberación controlada elaboradas con ciertos minerales [13].

1.4.2.3. Fertilizantes NPK y NPK-CD. Los fertilizantes NPK contienen una mezcla balanceada de nitrógeno, fósforo y potasio en una fórmula integrada, proporcionando una disponibilidad rápida de todos los nutrientes esenciales, pero con una alta tasa de solubilidad que puede llevar a pérdidas por lixiviación. Por otra parte, los fertilizantes NPK-CD (también conocidos como N-P-K) se componen de nutrientes individuales mezclados en proporciones diferentes entre sí, lo que puede resultar en una liberación más específica de nutrientes en comparación con los fertilizantes NPK, aunque no tan simple como la urea [12].

1.4.2.4. Fertilizantes de liberación lenta a base de zeolita. El fertilizante de liberación lenta a base de zeolita ofrece importantes ventajas económicas y ecológicas. Se elabora a partir de un material natural no tóxico, lo que garantiza su seguridad para el medio ambiente. Su

aplicación es sencilla al inicio del período de vegetación y proporciona una liberación gradual y uniforme de nutrientes, reduciendo la necesidad de aplicaciones frecuentes y minimizando el desperdicio. Además, mejora el balance hídrico del suelo, beneficiando cultivos sensibles a la humedad. Esto contribuye a un uso más eficiente del agua y a una agricultura más sostenible [1].

La liberación tiene efecto cuando las raíces de las plantas liberan iones de hidrógeno en el suelo, lo que puede desplazar los cationes (nutrientes) adsorbidos en las zeolitas mediante un proceso de intercambio catiónico, resultando en que los iones liberados por las raíces facilitan la disponibilidad de nutrientes para la absorción por las plantas [7]. Este proceso se da de manera lenta y constante, pero puede variar en respuesta a factores como la concentración de iones, la humedad y el pH del suelo.

Agustina et al. (2018) [3] investigaron el uso de zeolita natural de Indonesia en fertilizantes de liberación lenta. Compararon dos tipos de fertilizantes: uno compuesto por mezclas individuales de nutrientes NPK-CD (N-P-K), y otro comercial premezclado NPK. El fertilizante NPK-CD consistía en urea (46% N p/p), SP36 (36% P p/p), y KCl (45% K p/p), mientras que el fertilizante comercial NPK tenía proporciones de 16:16:16. Las muestras de zeolita fueron reducidas mediante molienda mecánica, homogenizadas y comprimidas con una presión hidráulica de 27,000 kPa durante 3 minutos. Las piezas resultantes se caracterizaron con SEM EDS para morfología y composición química, y la pureza de la zeolita se determinó con XRF y XRD. Se midió el total de sólidos disueltos (TDS) en suelo, agua doméstica y agua desmineralizada cada 24 horas; y los nutrientes se analizaron con Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS). Los resultados mostraron que la adición de zeolita redujo la solubilidad de los nutrientes, siendo el fertilizante NPK-CD + zeolita el de menor solubilidad con valores de 9.63 ppm/h, 23.97 ppm/h y 14.68 ppm/h en suelo, agua doméstica y desmineralizada, respectivamente.

Hoeung et al. (2018) [4] investigaron la eficiencia de la urea en fertilizantes de liberación lenta. En la granulación, se usaron mezclas de urea y zeolita natural en tamaños de partícula de 50, 60 y 80 mesh (0.3, 0.25 y 0.177 mm respectivamente), soluciones de aglutinante con diferentes porcentajes de almidón (2 - 10% p/p) y aditivos de arcilla (5%, 7.5% y 10% p/p). La mejor mezcla fue de 60 mesh de urea-zeolita, 3% p/p de almidón y 7.5% p/p de arcilla, con el gránulo de 3-4 mm (muestra denominada como M60S3C7.5G3-4) porque obtuvo la más baja tasa de liberación: 0.063% p/p de urea. Se observa la masa acumulativa de urea liberada de M60S3C7.5G3-4 y otras mezclas. Esta combinación mostró una liberación de nutrientes estimada de al menos tres meses, siendo adecuada para cultivos de arroz.

Souza et al. (2018) [2] formularon fertilizantes con urea pulverizada de granulometría de 0.35 mm y zeolita pulverizada de 0.8 mm o menos. Luego, se compactaron en gránulos de 7.0 mm de diámetro con grosor de 4.0 mm. La urea con zeolita aumentó la disponibilidad de nitrógeno en el suelo de mejor forma que la urea sin zeolita. Otra investigación realizada por Soca et al. (2016) [14] indica que las partículas de zeolita inferiores a 1 mm aumentan la retención especialmente de Na^+ y K^+ .

Capítulo 2

2. Metodología

En este capítulo se aborda la metodología que se usó para el diseño del fertilizante, desde la elaboración de pastillas fertilizantes de diferentes composiciones hasta las pruebas realizadas para medir la capacidad de liberación de nutrientes. Adicionalmente, se realizó microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (SEM-EDS) a la zeolita, fertilizantes desarrollados y comerciales con el fin de reconocer las características morfológicas del producto. Finalmente, se establecieron los criterios necesarios para seleccionar a la mezcla más adecuada para la liberación lenta y sostenida de nutrientes.

Para realizar un fertilizante NPK-CD a base de zeolita se necesitó, aparte de este mineral principalmente, sustancias químicas donde se hallen presentes el nitrógeno, fósforo y potasio.

Se emplearon los siguientes compuestos para conseguir dichos elementos: urea, nitrato de potasio y roca fosfórica.

2.1. Preparación de muestras

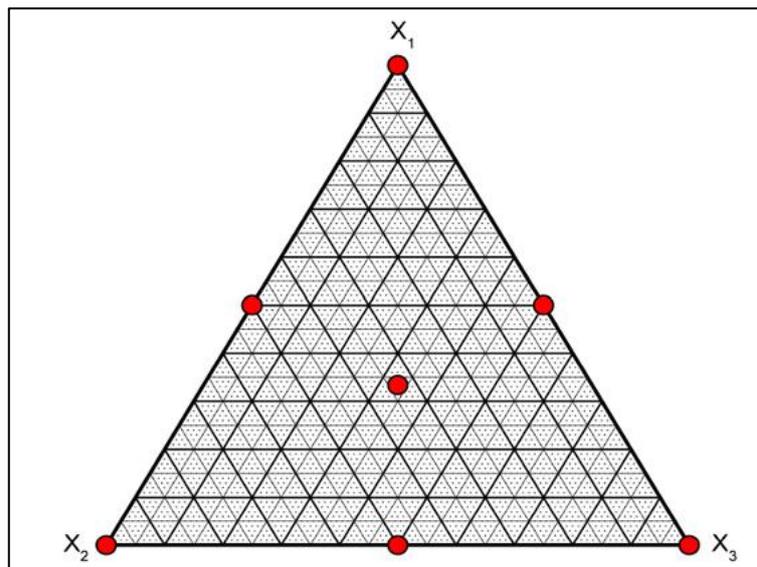
La elaboración de muestras engloba a la formulación de las composiciones de las muestras y la fabricación de las pastillas de fertilizante.

2.1.1. *Composiciones de las muestras*

Para elaborar las composiciones de las muestras, se realizó un formato SIMPLEX de diseño de mezclas, el cual puede ser representado como un triángulo equilátero donde cada vértice representa un componente puro, los lados representan mezclas binarias y los puntos dentro del triángulo representan mezclas ternarias, tal como se ve en la Figura 2.1. Este triángulo permite identificar rápidamente las proporciones de cada componente (X_1 , X_2 , X_3) y realizar combinaciones con estos valores para encontrar el resultado óptimo [15].

Figura 2.1

Esquema de formato SIMPLEX (diseño de mezclas).



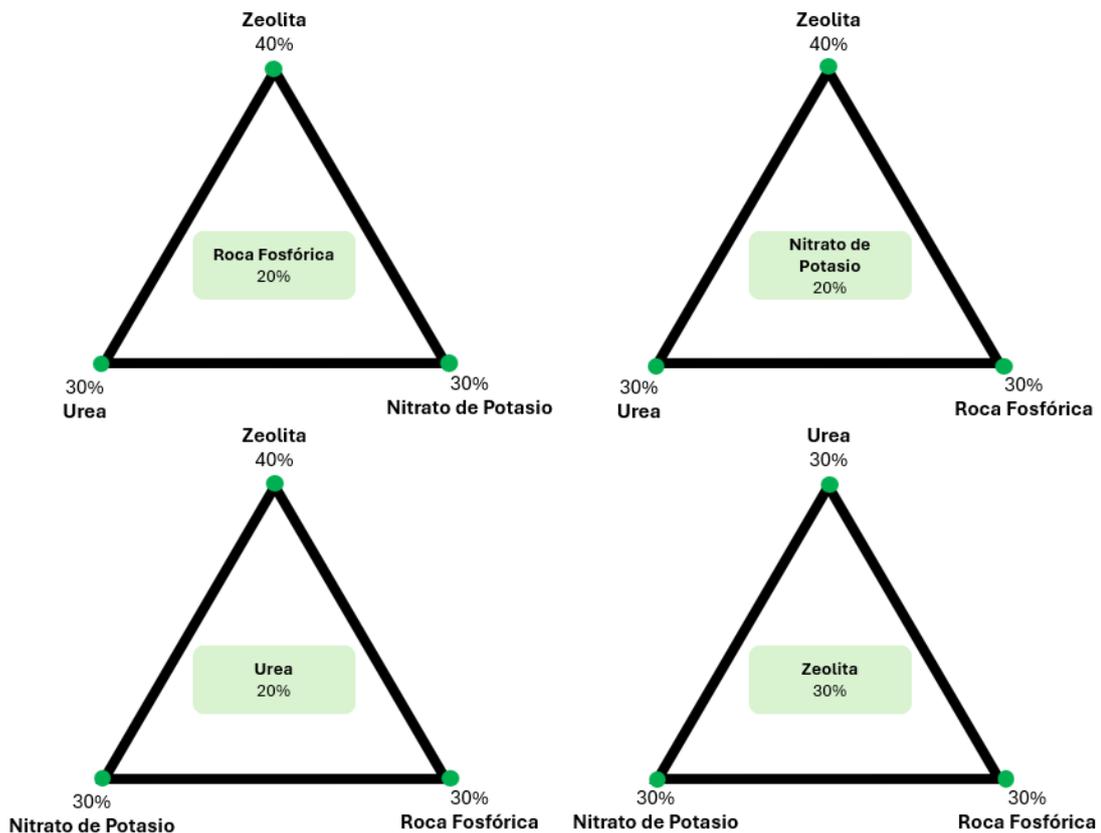
Nota. Tomado de Experimental design in chemistry: A tutorial por Leardi, 2009 [15].

Sin embargo, este proyecto se basa en la mezcla de 4 componentes, lo que no aplicaría para los vértices de un único triángulo, por lo que se tuvo que realizar tres esquemas más, donde en cada uno hay un componente que se mantiene constante.

Como se está trabajando con cuatro componentes, se dividió el diseño en cuatro triángulos, como se observa en la Figura 2.2. En cada triángulo, uno de los componentes se mantiene constante mientras varían las proporciones de los otros tres componentes. El valor en el centro de cada triángulo representa el componente constante para esa serie de combinaciones. Este enfoque permite explorar cómo las diferentes proporciones de los tres componentes variables afectan las propiedades de las pastillas, mientras mantenemos un componente fijo.

Figura 2.2.

Esquema del formato *SIMPLEX* para los cuatro componentes.



Realizando esta técnica, se obtuvo un total de 27 combinaciones, cada una con una composición diferente. Aplicando aleatorización de los resultados, se obtuvieron las proporciones que se presentan en la Tabla 2.1.

2.1.2. Elaboración de pastillas

Al tener las composiciones para cada una de las muestras se procedió a realizar las pastillas. Para que la mezcla esté uniforme, se tuvo que moler (Figura 2.3) y tamizar cada una de las sustancias que se iban a usar, pues cada una de ellas estaba en su forma macro. Para tamizar, se optó por el tamaño de 70 mesh (0.21 mm) tomando en cuenta los resultados de la investigación de Hoeung (2018) [4], quien recomienda este rango de tamaño de partícula para liberación de nutrientes. Al tener todos los componentes molidos y de un tamaño de partícula de

0.21 mm, se procedió a mezclar y homogeneizar cada una de las muestras acorde a su composición en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1

Composición de muestras aplicando aleatorización.

COMPOSICIÓN DE MUESTRAS [%p/p]				
No. de muestra	Zeolita	Urea	Nitrato de Potasio	Roca Fosfórica
1	30.00	20.00	20.00	30.00
2	30.00	20.00	30.00	20.00
3	31.25	26.25	21.25	21.25
4	32.50	22.50	22.50	22.50
5	36.25	21.25	21.25	21.25
6	32.50	22.50	22.50	22.50
7	31.25	21.25	21.25	26.25
8	30.00	20.00	20.00	30.00
9	31.25	26.25	21.25	21.25
10	36.25	21.25	21.25	21.25
11	31.25	21.25	26.25	21.25
12	30.00	20.00	30.00	20.00
13	40.00	20.00	20.00	20.00
14	31.25	21.25	26.25	21.25
15	30.00	30.00	20.00	20.00
16	30.00	30.00	20.00	20.00
17	30.00	20.00	30.00	20.00
18	31.25	21.25	21.25	26.25
19	32.50	22.50	22.50	22.50
20	36.25	21.25	21.25	21.25
21	30.00	20.00	20.00	30.00
22	31.25	21.25	26.25	21.25
23	31.25	21.25	21.25	26.25
24	40.00	20.00	20.00	20.00
25	31.25	26.25	21.25	21.25
26	30.00	30.00	20.00	20.00
27	40.00	20.00	20.00	20.00

Figura 2.3

Muestra de urea siendo molida en un mortero

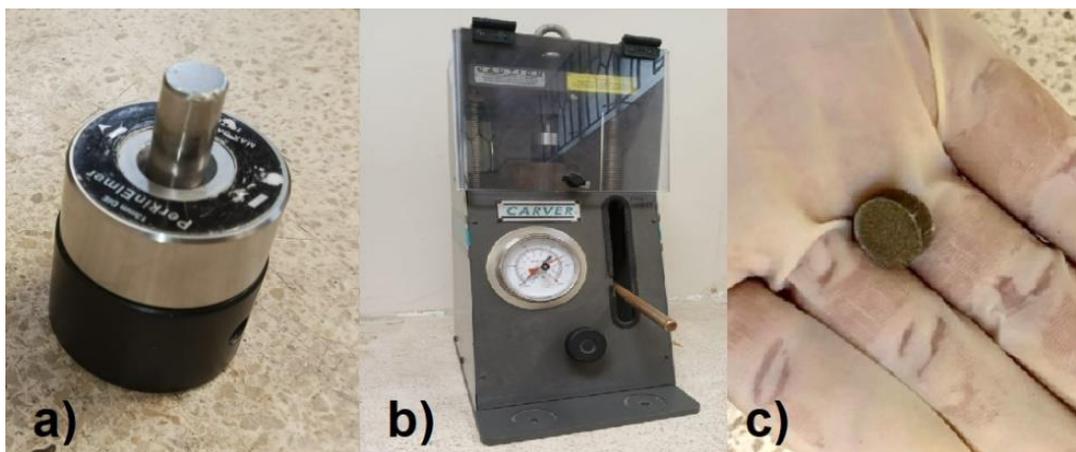


Tras mezclar y homogeneizar las 27 mezclas, el siguiente paso fue compactar el polvo de cada una de ellas en una prensa modelo CARVER 4350 L (Figura 2.4a) usando un dado PerkinElmer-13mm (Figura 2.4b), y de esta manera obtener las pastillas fertilizantes de 1 g cada una. En la compactación, se aplicó una carga de 8 toneladas métricas en un tiempo de 2 minutos.

Las pastillas obtenidas tuvieron un color marrón oscuro y una alta consistencia. Sus dimensiones son: 1.35 ± 0.05 cm de diámetro y 0.45 ± 0.05 cm de espesor. La Figura 2.4c exhibe un ejemplar de las pastillas fabricadas.

Figura 2.4

a) Dado Perkin- Elmer 13mm, b) prensa CARVER 4350 L, c) pastilla de fertilizante NPK-CD.



2.2. Selección de mezclas por capacidad de liberación de nutrientes

Para tener un indicador de la capacidad de cada una de las 27 pastillas para liberar nutrientes, se optó por realizar ensayos de liberación de iones en agua destilada. En este escenario se produce un intercambio de iones causado por la estructura de la zeolita, lo que hace que los nutrientes (iones) salgan al medio [7], pudiendo ser medidos con el conductímetro digital (ver sección 2.3.1).

Dado que se quiere indagar en la influencia de los cuatro componentes de las pastillas en la liberación de nutrientes, y considerando que cada componente sigue una tendencia en dicha liberación, se procedió a seleccionar, de entre los resultados, la muestra con la mayor liberación de nutrientes, una de mediana capacidad de liberación, y la pastilla con la más baja liberación para un análisis más profundo.

2.3. Ensayos realizados

Se realizó un ensayo de total de sólidos disueltos (TDS) y conductividad eléctrica (CE) para las 27 pastillas. Luego, con las 3 pastillas selectas para un análisis más profundo, se realizaron pruebas adicionales con el propósito de indagar más en sus propiedades y su potencial como fertilizante, estas pruebas fueron de capacidad higroscópica y peso volumétrico. También se realizó la caracterización SEM-EDS a la zeolita utilizada, pastillas desarrolladas y pastillas de fertilizantes comerciales.

2.3.1. Total de sólidos disueltos (TDS) y conductividad eléctrica (CE)

Investigaciones señalan que la temperatura, en fertilizantes inorgánicos, no es una variable muy influyente en la velocidad de liberación de nutrientes [16], sin embargo, en los fertilizantes de liberación lenta se indica que sí lo es [17].

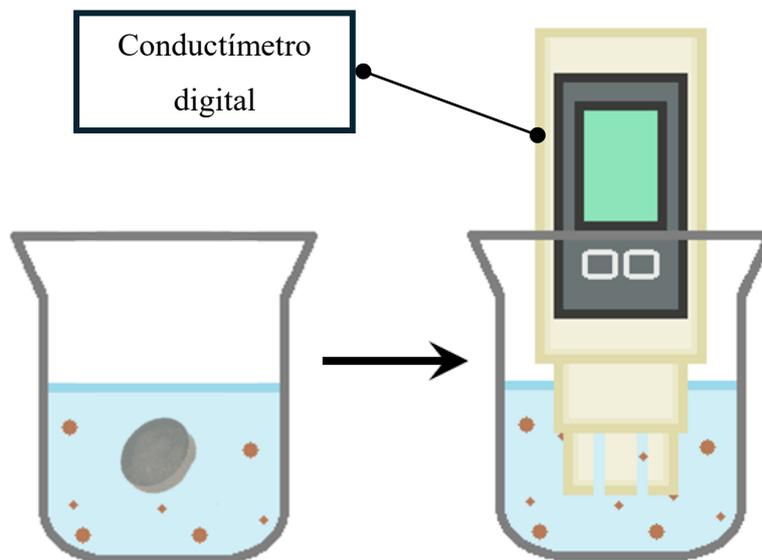
Para propósito de este ensayo, considerando que la mezcla es inorgánica, se utilizaron 100 mL de agua destilada a 25 °C en un vaso de precipitación donde se sumergió la pastilla fertilizante sometida a una agitación de 200 rpm durante 3 horas en el agitador magnético

JOANLAB® HSC-19T. Con un conductímetro digital se midió el total de sólidos disueltos (ppm) y la conductividad eléctrica ($\mu S/cm$) en 3 periodos: al inicio (0 minutos), a la mitad (90 minutos) y al final (180 minutos); se utilizaron estos periodos para evaluar tanto la tasa inicial de disolución como la liberación prolongada. Se seleccionaron las pastillas que evidenciaron una alta, mediana y baja capacidad de liberación de nutrientes por motivos explicados anteriormente.

Para medir la liberación de nutrientes en ppm y en $\mu S/cm$ se usó un conductímetro digital de marca Pancellet, similar a lo que Agustina realizó [3], con el cual se obtuvo la conductividad eléctrica en microSiemens por centímetro ($\mu S/cm$) como indicador de liberación de nutrientes por parte del fertilizante. La Figura 2.5 ilustra este paso.

Figura 2.5

Esquema del ensayo con el conductímetro digital ilustrado.



El conductímetro envía una corriente eléctrica a través de la solución y mide la resistencia al flujo de esta corriente. La resistencia depende de la cantidad y movilidad de los iones presentes en la solución mide la conductividad total de la solución, que refleja la presencia y movilidad de todos los iones presentes, tanto positivos como negativos [18].

De igual manera, este instrumento utiliza un factor de conversión empírico para convertir la conductividad medida en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a concentración en ppm. Este factor varía dependiendo de la composición iónica de la solución y está basado en la relación promedio entre conductividad y concentración para soluciones específicas. Al igual que con la medición de conductividad, esta lectura en ppm no distingue entre los tipos de iones ni entre los cationes y aniones específicos [18].

Este ensayo fue el único realizado a las 27 muestras, ya que las pastillas por analizar fueron seleccionadas según los resultados. Asimismo, con estos resultados se pudo realizar el análisis de componentes principales.

2.3.1.1. Análisis de componentes principales (PCA). Se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA), una técnica estadística que toma un grupo de variables que están relacionadas entre sí y las convierte en un número menor de variables nuevas e independientes, llamadas componentes principales. Cada uno de estos componentes, también conocidos como dimensiones, refleja cierta cantidad de información. La primera dimensión captura la mayor cantidad posible de variación en los datos, la segunda dimensión captura la mayor parte de la variación restante, y así sucesivamente [19].

Con la información de la Tabla 2.1, se recopiló y organizó la información sobre la composición de las pastillas de fertilizante. A continuación, se realizó una prueba de correlación entre estos componentes y los resultados de TDS y CE, para identificar posibles relaciones directas entre ellos.

Por último, se realizó una interpretación de los resultados obtenidos a partir del PCA, identificando cuáles de los componentes del fertilizante contribuyen más significativamente a los cambios observados en la concentración de nutrientes y la CE. Este análisis permite determinar qué componentes tienen una mayor correlación, es decir, una mayor influencia en el comportamiento de las pastillas de fertilizante, facilitando en un futuro, la optimización de sus formulaciones.

2.3.1.2. Comportamiento de liberación. Para evaluar el comportamiento de liberación de nutrientes de las muestras seleccionadas, se llevó a cabo un ensayo de liberación controlada; donde las pastillas de fertilizante fueron sumergidas en agua destilada y luego se disolvieron naturalmente durante un período de 21 días, registrando diariamente las concentraciones de nutrientes liberados en partes por millón (ppm).

Con base en los datos obtenidos durante los 21 días, se aplicaron modelos predictivos para estimar el comportamiento de liberación de nutrientes en un periodo extendido hasta 26 días.

2.3.2. Capacidad higroscópica

Primero, se secaron las muestras durante 24 horas a 50°C en un horno de laboratorio para eliminar toda la humedad de la pastilla (especialmente la retenida por la zeolita) y se tomó la masa de cada una.

Después, se dejaron tres ejemplares de cada pastilla a la intemperie por tres días a una humedad relativa promedio de 80%; y luego, sus nuevos pesos fueron registrados. Finalmente, para determinar la cantidad de agua absorbida por las pastillas y su porcentaje, se emplearon las Fórmulas 2.1 y 2.2:

$$\text{Agua absorbida (g)} = m_1 - m_0 \quad (2.1)$$

$$\% \text{ Agua absorbida} = \left(\frac{m_1 - m_0}{m_0} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

Donde m_0 es la masa de las pastillas en gramos después del secado y m_1 es la masa en gramos luego de haber absorbido agua. De esta manera, se cuantificó la capacidad higroscópica de las muestras. Este procedimiento se realizó tres veces para obtener un resultado más preciso. En la Figura 2.6 se observan las pastillas de fertilizante en una bandeja antes de entrar al horno.

2.3.3. Peso volumétrico

Las muestras fueron secadas en el horno a 50°C durante 24 horas, se midió su masa con una balanza de precisión y se registró el valor en gramos. Luego, por cada pastilla se llenó una

probeta (con error ± 0.25 ml) con 100 mL de aceite, y se las sumergió por completo en sus respectivos vasos. Se observó el nuevo volumen formado con el aceite y la pastilla fertilizante y se registró. El volumen de la pastilla se calculó restando el nuevo volumen obtenido y el volumen inicial. Finalmente, se empleó la fórmula de peso volumétrico para conseguir su valor.

La fórmula 2.3 resume este procedimiento:

$$\rho = \frac{m}{V_1 - V_0} \quad (2.3)$$

Donde ρ es el peso volumétrico, m es la masa de la pastilla en condiciones secas, V_0 es el volumen inicial del aceite en el vaso de precipitación (100 mL) y V_1 es el volumen final formado por la suma entre el aceite y la pastilla [20]. Este procedimiento se realizó tres veces para obtener un resultado más preciso.

Figura 2.6

Pastillas de fertilizante antes de entrar al horno.



2.3.4. Caracterización SEM

La zeolita utilizada, las pastillas desarrolladas, y las pastillas de fertilizantes comerciales fueron caracterizadas mediante SEM-EDS utilizando un dispositivo Inspect FEI®SEM en condiciones de alto vacío, operando a 15.5 kV y con un tamaño de punto de 4.0. Las

micrografías SEM-EDS permitieron evaluar la morfología, el tamaño de las partículas y la composición elemental de los componentes.

2.4. Criterios de evaluación para matriz de decisión

Tras realizar todos los ensayos, se obtuvieron las propiedades y características de las muestras seleccionadas y, para escoger la pastilla de fertilizante con las características óptimas, se realizó una matriz de decisión considerando a las propiedades obtenidas como criterios. Por lo tanto, teniendo en cuenta la influencia que estas propiedades tendrán en las pastillas de fertilizante, se realizó la Tabla 2.2 donde se explica la importancia de cada propiedad y por qué se la toma en cuenta como un criterio.

Tabla 2.2

Criterios de evaluación para la matriz de decisión

Criterio	Detalle
Total de sólidos disueltos	Indica la cantidad de nutrientes que están disponibles para las plantas en el suelo. Una alta concentración es adecuada.
Comportamiento de liberación de nutrientes	Asegura que las plantas reciban un suministro constante de nutrientes durante un período de tiempo adecuado. Se recomienda un comportamiento constante y reducido.
Baja capacidad higroscópica	La capacidad de las pastillas para absorber humedad puede afectar su almacenamiento y estabilidad antes de su aplicación. Se recomienda una baja capacidad higroscópica.
Peso volumétrico	Garantiza la consistencia y la capacidad de disolución de las pastillas. Un alto peso volumétrico acorde a las otras características es requerida.
Conductividad eléctrica	Ayuda a monitorear la presencia y la cantidad de nutrientes en la solución.

Tomando en cuenta la importancia de cada una de las propiedades, en la Tabla 2.3 se optó por realizar una evaluación de los pesos específicos de cada criterio al momento de tomar la decisión final.

Tabla 2.3

Evaluación del peso específico para cada criterio de evaluación

Criterio	Total de sólidos disueltos	Comportamiento de liberación de nutrientes	Baja capacidad higroscópica	Peso volumétrico	Conductividad eléctrica	Σ TOTAL	Ponderación
Total de sólidos disueltos		0	1	1	1	3	0.3
Comportamiento de liberación de nutrientes	1		1	1	1	4	0.4
Baja capacidad higroscópica	0	0		0.5	0	0.5	0.05
Peso volumétrico	0	0	0.5		0	0.5	0.05
Conductividad eléctrica	0	0	1	1		2	0.2
					TOTAL	10	1

Se seleccionará a la pastilla que obtenga el mayor puntaje teniendo en cuenta los criterios mencionados con sus respectivos pesos.

2.5. Comparación de los fertilizantes desarrollados con fertilizantes comerciales

Asimismo, se recrearon las mismas pruebas y ensayos (excepto la prueba de peso volumétrico) con pastillas de tres fertilizantes ya existentes en el mercado, considerados de excelente rendimiento, con la finalidad de comparar esas muestras con las elaboradas en este proyecto en condiciones controladas y estandarizadas. Estos fertilizantes comerciales (y sus respectivas composiciones) se presentan a continuación:

- **F1:** NPK 16:16:16.
- **F2:** 25% Ca, 15% Mg.
- **F3:** 28% Ca, 12% Mg, 10% S.

El primero (F1) es un fertilizante NPK de liberación inmediata, mientras que los restantes (F2 y F3) son de liberación lenta. Se compararon las características de ambos tipos de fertilizante, entregando una base sólida para futuras optimizaciones y aplicaciones prácticas.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos y también se realiza un análisis económico de este proyecto.

3.1. Selección de mezclas

Tras realizar el ensayo de TDS y CE (ver sección 2.3.1), se obtuvieron los resultados de las 27 muestras, los cuales pueden ser observados en las Tablas A.1 y A.2 del Apéndice A. Las muestras #2, #20 y #27 fueron seleccionadas según su alta, mediana y baja capacidad de liberación, respectivamente, para tener un indicador de qué incide en su comportamiento de liberación. Las composiciones de estas pastillas son reportadas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1

Composición de las muestras seleccionadas

Composición de las muestras [%w/w]				
No. de muestra	Zeolita	Urea	Nitrato de Potasio	Roca Fosfórica
2	30	20	30	20
20	36.25	21.25	21.25	21.25
27	40	20	20	20

3.2. Ensayos realizados

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos en los ensayos de sólidos disueltos y conductividad eléctrica, capacidad higroscópica, peso volumétrico y comportamiento de liberación de nutrientes con su respectiva comparación a los fertilizantes comerciales (uno convencional y dos de liberación lenta).

3.2.1. Total de sólidos disueltos (TDS) y conductividad eléctrica (CE)

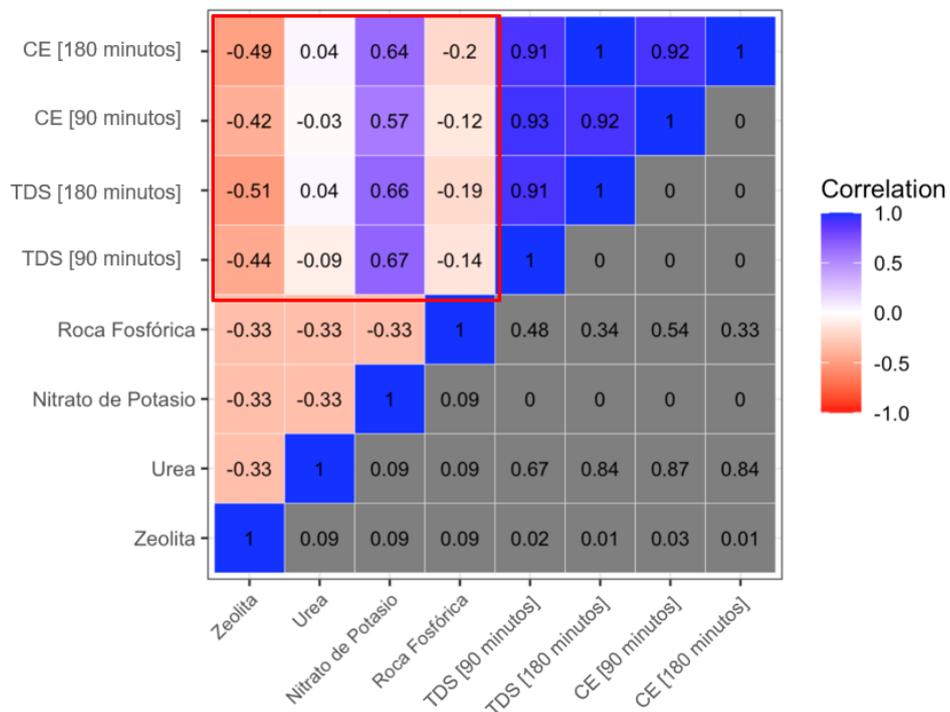
Tras obtener los resultados de las 27 muestras (Tablas A.1 y A.2) se procedió a realizar el análisis estadístico.

3.2.1.1. Análisis de correlación entre los componentes y los resultados. Entre los primeros elementos que se consideran en un PCA está el análisis de la matriz de correlación. Cuando un componente tiene correlación con otro, significa que el cambio de uno afecta al otro. La Figura 3.1 presenta la correlación entre las diferentes variables analizadas, como el contenido de zeolita, urea, nitrato de potasio y roca fosfórica de los fertilizantes, sus valores de sólidos disueltos y conductividad eléctrica medidas a los 90 y 180 minutos, así como su significancia estadística.

Se observa que los niveles de TDS y CE están fuertemente correlacionados. Una correlación alta significa que existe una fuerte relación entre dos variables. Si esta correlación es positiva, significa que son proporcionales, y si es negativa, es inversamente proporcional.

Figura 3.1

Matriz de correlación de variables.

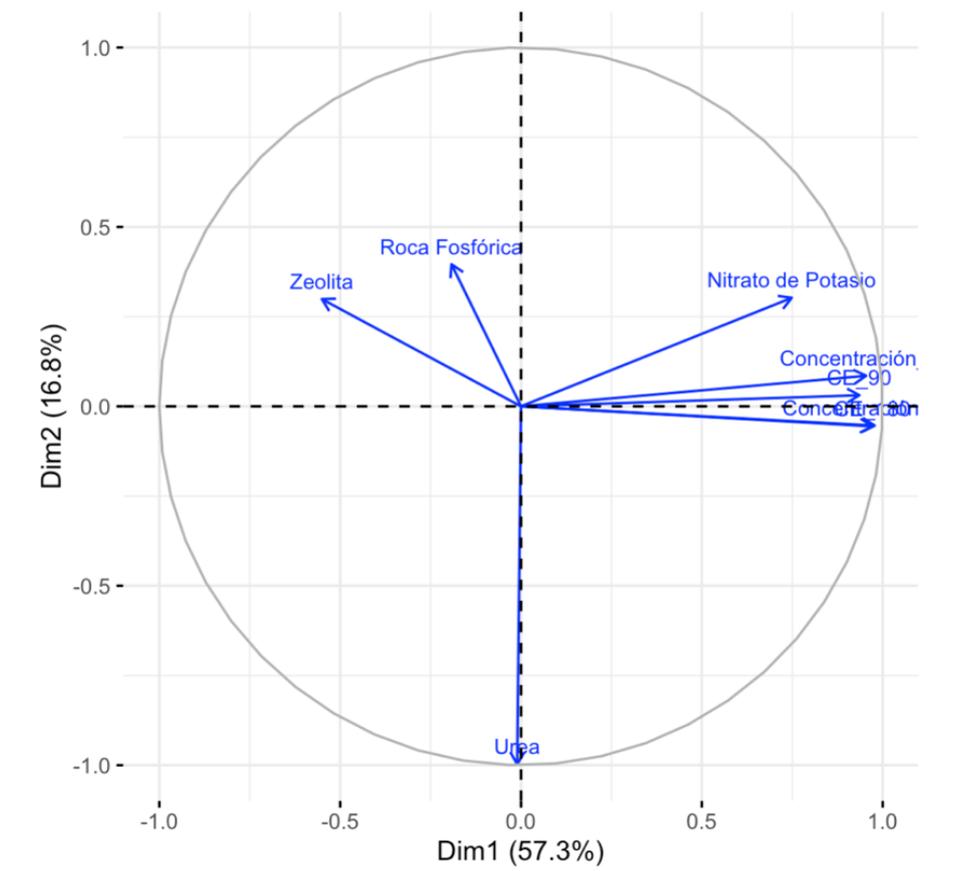


Dentro del cuadrado rojo se observa que, en relación con estos niveles, el nitrato de potasio muestra una correlación positiva buena, la zeolita presenta una correlación negativa moderada; la roca fosfórica, una correlación negativa baja, y la urea no se muestra correlacionada.

La Figura 3.2 muestra cómo se proyectan las variables en las dos primeras dimensiones (Dim1 y Dim2), que explican el 74.17% (Dim1: 57.3% y Dim2: 16.8%) de la variabilidad total de los datos. Los vectores en el gráfico representan las variables originales: su longitud indica cuánta influencia tienen en las dimensiones, y el ángulo entre los vectores refleja la correlación entre las variables. Ángulos pequeños muestran una alta correlación positiva, ángulos de 90 grados indican que no hay correlación, y ángulos cercanos a 180 grados sugieren una correlación negativa alta.

Figura 3.2

Variables en los dos componentes principales.



El gráfico revela que las variables de TDS (Concentración en el gráfico) y conductividad eléctrica son las que más contribuyen al primer componente (Dim1). Estas variables están fuertemente correlacionadas entre sí y con el nitrato de potasio, lo que sugiere que, a mayor contenido de nitrato de potasio, mayor es la concentración en la solución disuelta por el fertilizante y la conductividad eléctrica.

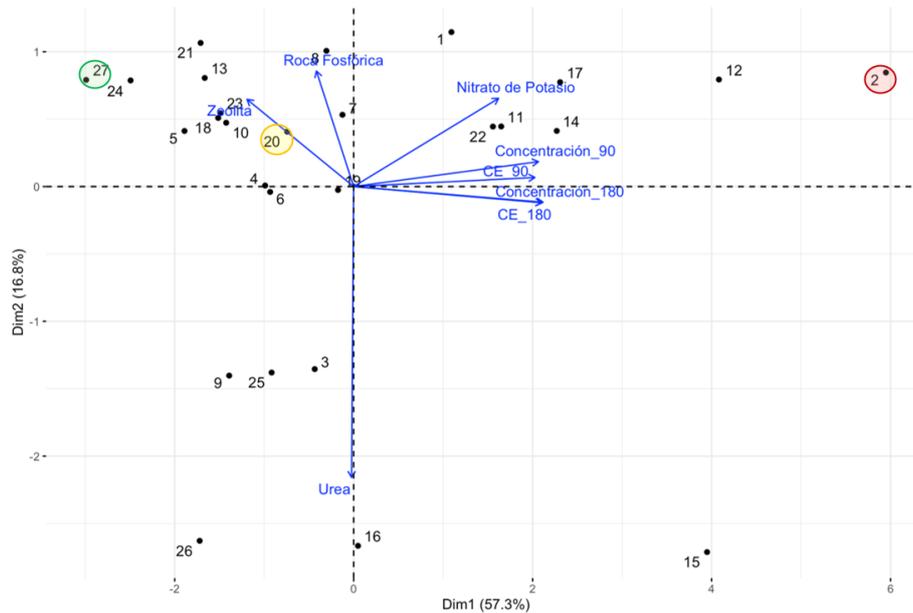
Por otro lado, el contenido de zeolita muestra una relación inversa con la concentración y la conductividad eléctrica. Esto sugiere que un mayor contenido de zeolita reduce la conductividad eléctrica y la concentración del fertilizante en el agua. La roca fosfórica también muestra una relación inversa similar, pero menos pronunciada.

El segundo componente (Dim2) está principalmente influenciado por la urea, que no muestra correlación con la conductividad eléctrica y/o concentración. Esto podría indicar que la urea no está contribuyendo al incremento ni a la disminución de la solubilidad del fertilizante. Aunque la urea es conocida por su capacidad para aportar nitrógeno a la biomasa [21], es importante destacar que el nitrato de potasio también desempeña un papel similar. Sería interesante, para futuras investigaciones, experimentar con fertilizantes que no incluyan urea, dado que no incide en la solubilidad y su contribución de nitrógeno podría ser asumida por el nitrato de potasio.

La Figura 3.3 presenta en un mismo plano, formado por las dos primeras dimensiones del PCA, las variables (que ya fueron revisadas en la Figura 3.2). Se observa que los mejores escenarios están dados por las muestras #27, #24, #21 y #5, porque son los que en el agua presentan baja conductividad eléctrica, en consecuencia, no se diluyen con rapidez y pueden permanecer más tiempo sin disolverse. Estos fertilizantes son ricos en zeolita, tienen un contenido medio de roca fosfórica y bajo de nitrato de potasio.

Figura 3.3.

Biplot de PCA: Proyección de Variables y Muestras de Fertilizantes en las Dimensiones 1 y 2.



Los fertilizantes que tuvieron los resultados más deficientes, en términos de resistencia a la solubilidad, son las muestras #2, #12, #14 y #17. Estos compuestos son ricos en nitrato de potasio, pero bajos en roca fosfórica, y mucho más en zeolita. Además, presentan alta conductividad eléctrica y en consecuencia se disuelven en menos tiempo. La muestra #15 también se ubicó en este grupo de alta solubilidad, pero, su característica esencial es que es rico en urea.

3.2.1.2. Comparación entre las mezclas desarrolladas y las comerciales. Las Figuras 3.4 y 3.5 denotan que la muestra #2, con una proporción equilibrada de zeolita (30%), urea (20%), nitrato de potasio (30%) y roca fosfórica (20%), mostró una rápida liberación de nutrientes, reflejada en sus valores de TDS y CE, similar al descrito en el artículo de Barbi [22], donde la rápida liberación de nutrientes en los LWA (compuestos de agregados ligeros) recubiertos es asociada con una mayor conductividad eléctrica en solución.

En contraste, la muestra #27, con una mayor proporción de zeolita (40%), mostró una liberación más lenta con menores incrementos en TDS y CE.

El fertilizante de liberación inmediata comercial (F1) tiene una gran cantidad de sólidos disueltos liberados, pues este intenta suplir la demanda de nutrientes inmediatamente, mientras que los fertilizantes de liberación lenta disponibles en el mercado (F2, F3) demuestran un rendimiento superior al exhibir curvas estables a lo largo del tiempo, indicando que la cantidad de nutrientes liberados en la solución es mínima y sostenida, manteniendo la disponibilidad de nutrientes a lo largo del tiempo sin liberar grandes cantidades de sólidos disueltos en la solución.

Es probable que estos fertilizantes tengan recubrimientos poliméricos o de azufre [13], sin embargo, debido a que la empresa fabricante no comparte abiertamente la fórmula, no se puede confirmar con certeza qué tecnología es responsable de la liberación lenta de estos fertilizantes.

Figura 3.4

Total de sólidos disueltos en ppm de las muestras fabricadas y muestras comerciales.

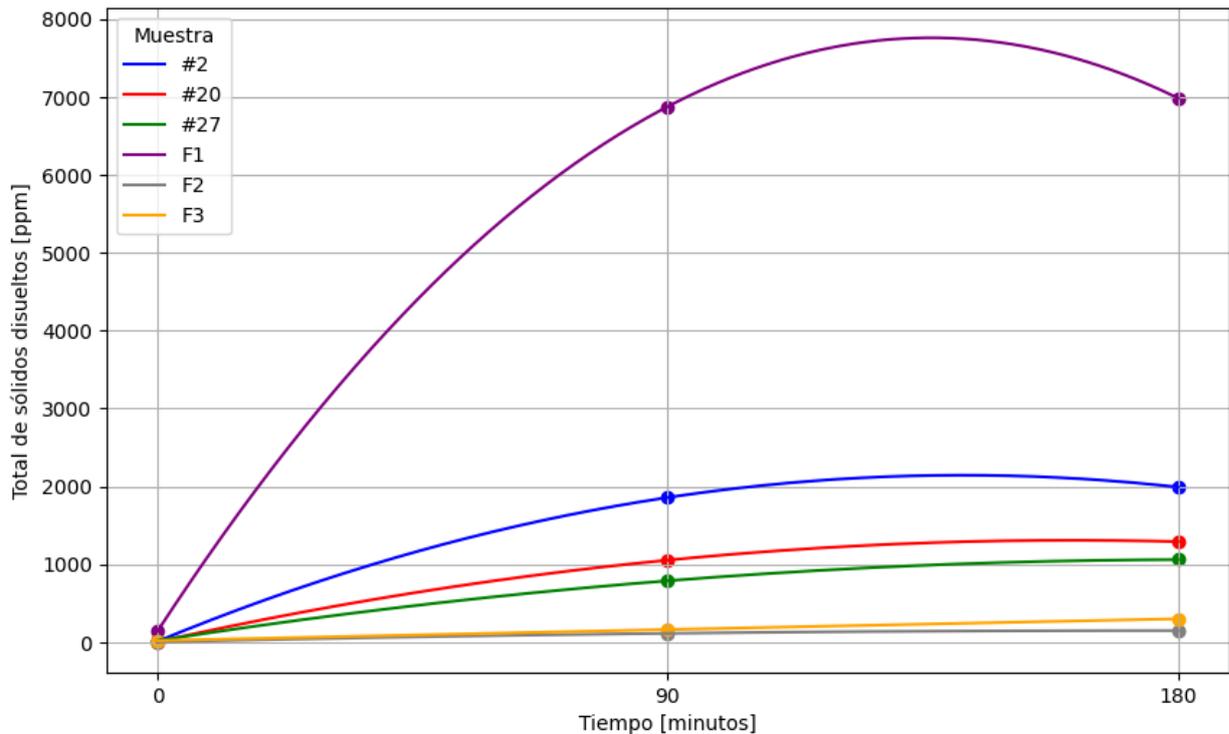
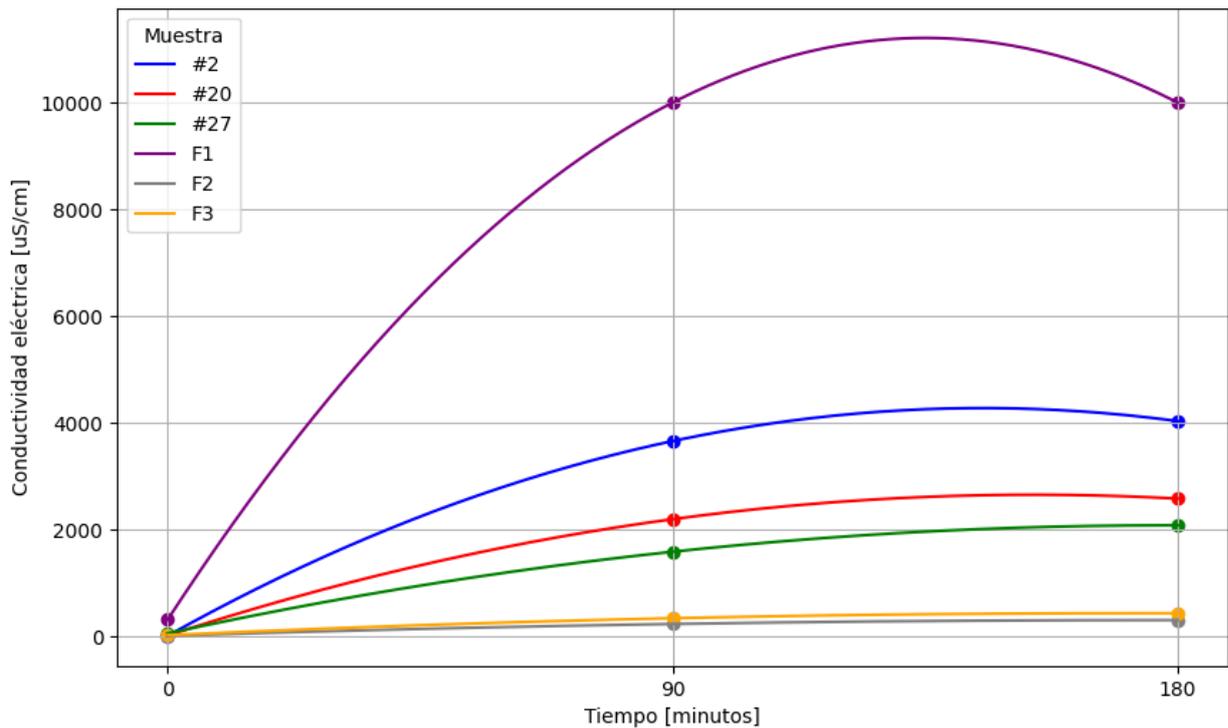


Figura 3.5

Conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$ de las muestras fabricadas y muestras comerciales.

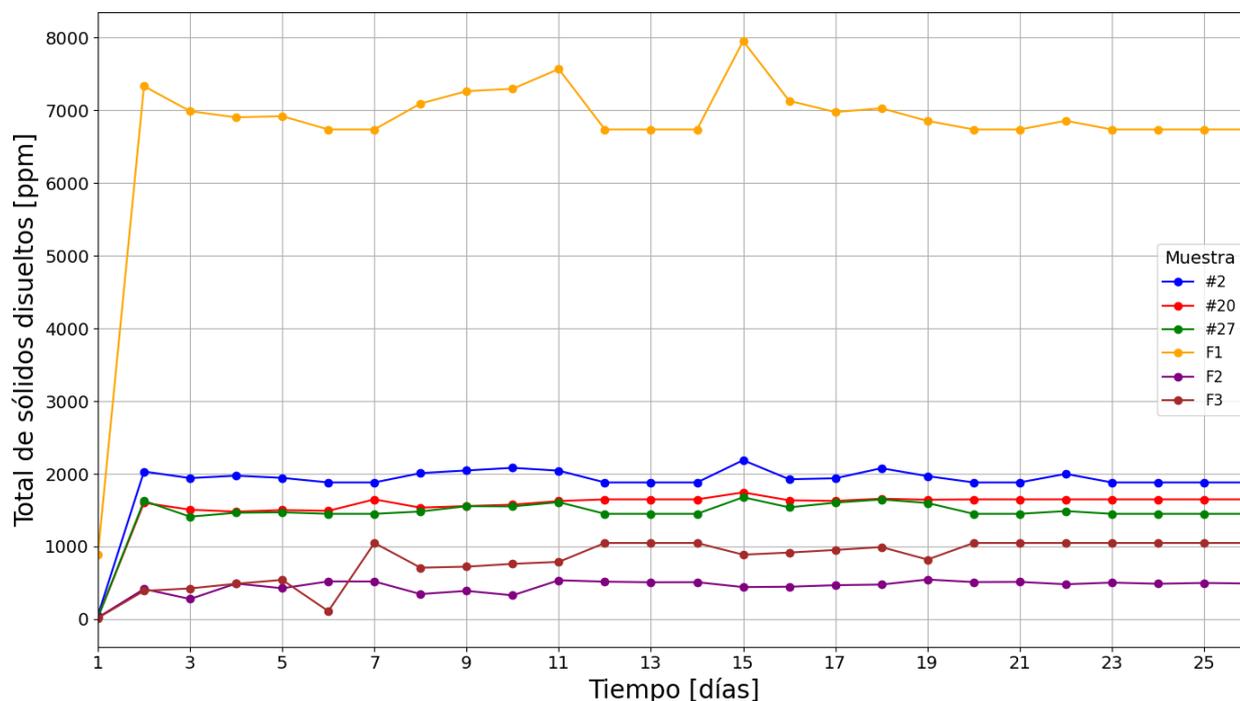


3.2.1.3. Comportamiento de liberación de nutrientes. Durante un periodo de 26 días, el comportamiento de liberación de nutrientes de las muestras de fertilizantes formuladas (#2, #20, y #27) muestra diferencias claras en comparación con los fertilizantes comerciales de liberación rápida (F1) y de liberación lenta (F2 y F3). El análisis detallado de la Figura 3.6 revela patrones de liberación que están intrínsecamente ligados a la composición de cada fertilizante.

Durante los primeros 10 días, se observa un aumento moderado en la concentración de nutrientes en la solución de todas las muestras seguido de una estabilización que persiste hasta el final del periodo de observación. Este comportamiento sugiere que los fertilizantes formulados liberan los nutrientes a un ritmo que acompaña la demanda de las plantas, evitando picos abruptos que podrían resultar en una rápida lixiviación de nutrientes.

Figura 3.6

Comportamiento de liberación de las muestras de fertilizante a través del tiempo.



La muestra #2 tiene una liberación ligeramente más elevada en comparación con las muestras #20 y #27. Este comportamiento puede estar relacionado con la cantidad presente del nitrato de potasio, el cual facilita una liberación más dinámica en las primeras fases del ensayo. Sin embargo, la estabilización posterior indica que, aunque la liberación inicial es más activa, la presencia de zeolita sigue regulando el proceso, evitando que la liberación se torne demasiado rápida o ineficiente.

Por su parte, la muestra #27, que contiene la mayor proporción de zeolita, muestra una liberación más lenta y constante. Este comportamiento es consistente con estudios previos que destacan la capacidad del mineral para actuar como una trampa de nutrientes, liberándolos de manera sostenida a lo largo del tiempo [23].

Basado en las tendencias observadas, se prevé que las muestras formuladas (#2, #20, y #27) continuarán manteniendo una liberación estable de nutrientes, con posibles disminuciones marginales debido al agotamiento progresivo de los mismos.

El fertilizante F1 muestra un comportamiento característico de los fertilizantes de liberación rápida: un pico alto y temprano en la concentración de nutrientes, seguido de una estabilización en niveles elevados. En los primeros días, alcanza concentraciones cercanas a los 8000 ppm, reflejando su rápida solubilización y disponibilidad inmediata para las plantas. Este comportamiento, aunque efectivo en contextos donde se necesita una respuesta rápida del cultivo, puede conllevar riesgos significativos de lixiviación y desperdicio de nutrientes si no se maneja adecuadamente [17]. Se anticipa que la concentración de nutrientes se mantendrá alta por un tiempo, con ligeras fluctuaciones que reflejan la continua disolución de los nutrientes restantes, como los decaimientos en los días 11 y 15. En contraste, se espera que F2 y F3 sigan liberando nutrientes a un ritmo muy lento, manteniendo concentraciones bajas pero constantes hasta el final del periodo de predicción [23].

En comparación con los fertilizantes comerciales, las muestras formuladas presentan un equilibrio entre una liberación suficientemente rápida para satisfacer las necesidades inmediatas de las plantas, y una liberación prolongada que asegura un suministro continuo de nutrientes [17]; siendo satisfactorio, debido a que esto se encuentra en una fase inicial de un campo extenso por investigar.

3.2.2. Capacidad higroscópica

En la Tabla 3.2, se presentan los resultados de las mediciones de capacidad higroscópica para las diferentes muestras de fertilizantes evaluadas con su desviación estándar. Los valores de masa y agua absorbida se observan con más detalle en la Tabla B.1 del Apéndice B.

Las muestras #2, #20 y #27 mostraron capacidades higroscópicas promedio de 17.7%, 29.2% y 17.5%, respectivamente. La zeolita actúa como un reservorio de agua a su estructura microporosa, permitiendo una alta capacidad de retención de humedad [24].

Tabla 3.2

Resultados de las mediciones de capacidad higroscópica en las muestras

Muestra	Capacidad higroscópica [%]	Desviación Estándar
#2	17.7	0.018300
#20	29.2	0.064000
#27	17.5	0.023100
F1	10.5	0.034000
F2	3.7	0.016860
F3	1.2	0.000436

Las muestras #2, #20 y #27 mostraron capacidades higroscópicas promedio de 17.7%, 29.2% y 17.5%, respectivamente. La zeolita actúa como un reservorio de agua a su estructura microporosa, permitiendo una alta capacidad de retención de humedad [24].

Además de la zeolita, los demás componentes del fertilizante influyen significativamente en los resultados de higroscopicidad. La urea, en particular, es conocida por su alta capacidad higroscópica, por lo que es importante su almacenamiento en condiciones secas y en envases sellados para evitar la absorción de humedad [25]. El nitrato de potasio, por otro lado, no es un material que se destaque por retener agua en su estructura, y la roca fosfórica presenta típicamente un contenido de humedad máximo de 1.25% [26].

La urea, con niveles de absorción de humedad de aproximadamente 14-15% a una humedad relativa del 90%, desempeña un papel fundamental en la capacidad higroscópica de los fertilizantes [27]. Esto es evidente en la muestra #20, que mostró una alta capacidad higroscópica del 29.2%. Esta mezcla, que contiene un 36.25% de zeolita y un 21.25% de urea, presenta una estructura porosa que permite una interacción óptima entre los nutrientes y el agua (Figura 3.9). Esta porosidad, combinada con la elevada higroscopicidad de la urea, aumenta significativamente la capacidad de absorción de humedad de la muestra. Sin embargo, para

ciertas aplicaciones, es recomendable una capacidad higroscópica baja para retardar la disolución del fertilizante en el medio.

En contraste, la muestra #27, que contiene una mayor proporción de zeolita (40%) y menores cantidades de urea y nitrato de potasio (20% cada uno), mostró una capacidad higroscópica inferior (17.5%). A pesar de la similitud en las composiciones, la microestructura más compacta de la muestra #27, observada en la Figura 3.10, reduce la exposición de la urea al aire y, por lo tanto, disminuye su capacidad para absorber humedad en comparación con la muestra #20. Esta menor interacción con el agua, junto con una menor cantidad de nutrientes solubles en agua, explica la diferencia en la capacidad higroscópica observada entre ambas muestras [25].

La muestra F1, un fertilizante de liberación rápida NPK, presentó una capacidad higroscópica del 10.5%. Esta capacidad más baja es esperable, dado que los fertilizantes de liberación rápida están diseñados para disolverse rápidamente y no retener humedad por períodos prolongados [17].

Por otro lado, las muestras F2 y F3, que son fertilizantes de liberación lenta de alta calidad, mostraron capacidades higroscópicas del 3.7% y 1.2%, respectivamente. La baja capacidad higroscópica de estas muestras puede estar relacionada con el uso de recubrimientos (poliméricos o de azufre) que limitan la absorción de agua para controlar la liberación de nutrientes [24].

La alta capacidad de absorción de agua de las muestras #2, #20 y #27 puede ser atribuida a la interacción zeolita-urea y a las estructuras altamente porosas de las muestras, pues en otros tipos de fertilizantes de liberación lenta (por ejemplo, los que son a base de sales como carbonato cálcico), la capacidad higroscópica llega a 10% [28]. También, al ser un fertilizante basado únicamente en 4 componentes de los cuales 2 son urea y zeolita (altamente absorbentes [4]), es de esperar que la solubilidad excesiva de ambos contribuya a la capacidad higroscópica.

3.2.3. *Peso volumétrico*

La Tabla 3.3 muestran los resultados de peso volumétrico de las tres pastillas fertilizantes selectas, se tomaron tres mediciones por cada una para obtener un promedio. En la Tabla B.2 en el Apéndice B, se observan los valores de masa y volumen con mayor detalle.

Tabla 3.3

Peso volumétrico de fertilizantes desarrollados.

Muestra	Peso volumétrico [g/ml]	Desviación Estándar
#2	1.477	0.440
#20	1.109	0.546
#27	1.415	0.295

Las muestras presentan variabilidad en los resultados de sus mediciones, lo cual se atribuye al proceso de transporte de las pastillas. Durante este proceso, algunos miligramos podrían haberse perdido, generando inconsistencias en la masa y el volumen de las pastillas finales.

Un peso volumétrico bajo significa que la muestra tiene una limitada cantidad de nutrientes disponibles [29]. Por el contrario, una mayor masa compactada en un volumen permitirá más disponibilidad de iones en la muestra con menos intersticios para una mayor estabilidad [20].

La muestra #2 tiene el mayor peso volumétrico (1.477 g/ml), lo que indica una estructura más compacta. Continúa la muestra #27 con 1.415 g/ml, lo que significa una estructura relativamente compacta, pero con variabilidad, no tan distante de la muestra #2. Por último, la #20 tiene el peso volumétrico promedio más bajo (1.109 g/ml), esto podría sugerir una estructura con una mayor cantidad de espacios y poros relativamente pequeños, ya que el aceite, al no

poder entrar a los poros por su tamaño, produce un mayor volumen desplazado, obteniendo así un peso volumétrico bajo.

Solo las pastillas #2 y #27, por su mayor peso volumétrico, ofrecen una liberación de nutrientes más estable por tener iones suficientes que proporcionar al medio. Por otro lado, la pastilla #20 por su bajo peso volumétrico tiene menos nutrientes para liberar, lo cual no es favorable.

Se presentan los pesos volumétricos de los fertilizantes comerciales en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4

Pesos volumétricos de fertilizantes comerciales.

Fertilizante comercial	Peso volumétrico [g/ml]
F1	1.15 [30]
F2	1.201 [31]
F3	1.201 [32]

Los fertilizantes comerciales tienen una composición homogénea y un posible uso de aglutinantes para su densidad y, por ende, estabilidad. Aunque los fertilizantes con zeolita presentan pesos volumétricos compactos sin aglutinantes, estos aseguran una dosis adecuada de nutrientes por pastilla, garantizando un suministro efectivo.

3.2.4. Caracterización SEM

Las imágenes muestran la caracterización SEM de la zeolita usada en este proyecto, los fertilizantes desarrollados y los fertilizantes comerciales.

3.2.4.1. Zeolita. Tras analizar la micrografía, se observa que la zeolita de este proyecto tiene una granulometría de 20-108 μm , lo cual es un tamaño de partícula óptima para la realización de fertilizantes [2]. En la Figura 3.7a se observa una distribución uniforme de partículas de zeolita con tamaños variados, mostrando una estructura granular y porosa. En la

Figura 3.7b, se aprecian con mayor detalle las partículas individuales, revelando formas más definidas y la superficie rugosa de las partículas. Finalmente, en las Figuras 3.7c y d, se observan pequeñas cavidades que corresponde a los poros que la zeolita posee intrínsecamente (círculos verdes).

El espectro EDS (Figura C.1 del Apéndice C) revela la composición elemental de la muestra, mostrando un alto contenido de O (48.7% en peso) y Si (13% en peso). También se detectaron cantidades significativas de Al (4.4% en peso) y Ca (14.5% en peso). La presencia de otros elementos en menores concentraciones sugiere impurezas y posibles interacciones con otros componentes presentes en el entorno que, al interactuar con la zeolita, tiende a recibirlos entre sus poros [7], [9].

En el estudio hecho por Munawar et. al. (2021) [33] se evidenciaron cristales bien definidos de minerales con una estructura porosa, similares a los de la zeolita usada en este proyecto. En el estudio realizado por Algburi et. al. (2021) [34], la zeolita tenía partículas con una tendencia esférica en la superficie, similares a las presentadas en la Figura 3.7d (círculos blancos).

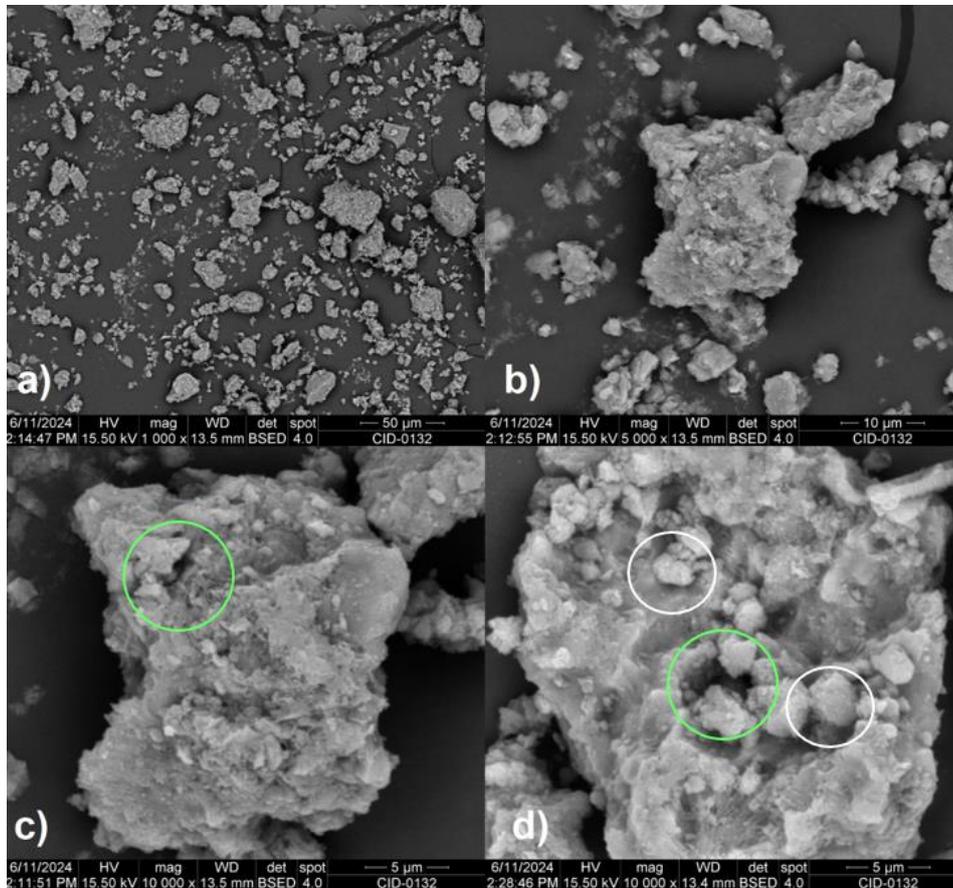
Como la cristalinidad alta en la zeolita se mantiene con temperaturas menores a 200 °C y la superficie rugosa favorece para la absorción de metales [33], la zeolita del presente proyecto conserva su alta cristalinidad porque no fue calentada, y al presentar una notable rugosidad, tiene una alta capacidad para receptar metales.

El estudio elaborado por Wibowo (2017) [35] muestra una imagen SEM de partículas de zeolitas naturales con un tamaño promedio aproximado de 18 μm . Se señala que el tamaño de las partículas de zeolita influye significativamente en su capacidad de absorción. Partículas más pequeñas tienen una mayor área de superficie específica, lo que aumenta la capacidad de absorción y retención de iones en la zeolita. La zeolita usada en este proyecto posee partículas que van desde 20 μm hasta los 108 μm , lo cual es útil para esta aplicación porque la literatura

indica que tamaños de partículas inferiores a 1 mm son ideales en liberación lenta por la retención que ofrecen [14].

Figura 3.7

Micrografías SEM de la zeolita usada en el proyecto.

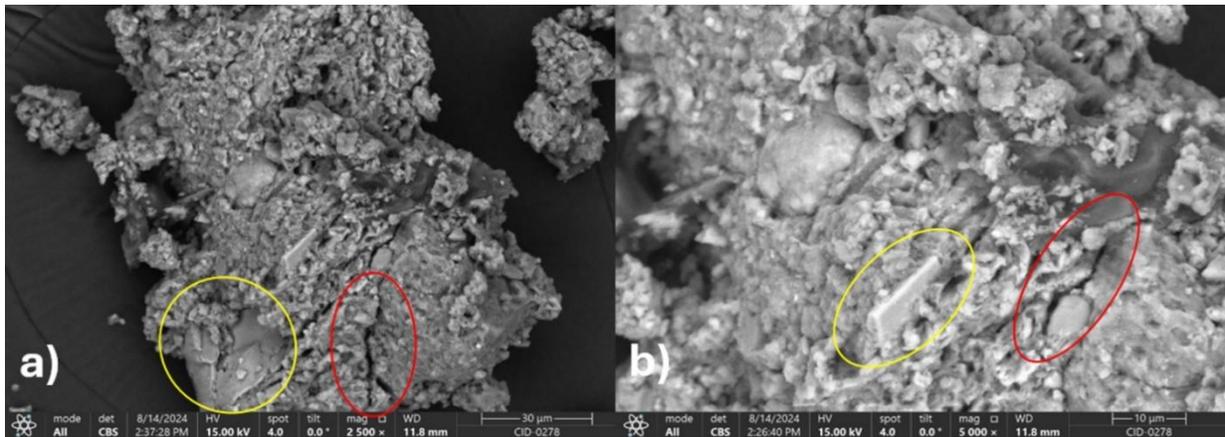


3.2.4.2. Muestra #2. Las micrografías SEM en la Figura 3.8a y 3.8b revelan una estructura granular con una distribución homogénea de los componentes, caracterizada por una superficie relativamente uniforme y partículas bien definidas. Las grietas observadas en algunas áreas (círculos rojos) pueden ser espacios entre las partículas que podrían actuar como rutas preferenciales para la entrada de agua, facilitando la liberación de los nutrientes [6], [8], [25]. Adicionalmente, se identificaron partículas no completamente integradas a la matriz que podrían corresponder a partículas de roca fosfórica o zeolita (círculos amarillos) [36]. Estas características estructurales explican en parte la alta capacidad de liberación observada en esta

muestra, dado que tanto las grietas como las partículas poco integradas pueden acelerar la disolución en contacto con la humedad.

Figura 3.8

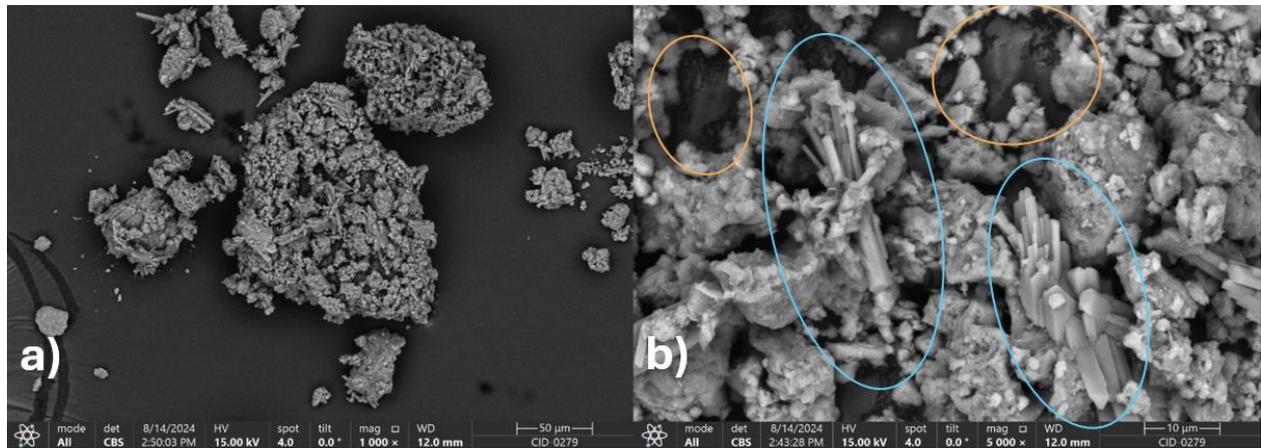
Micrografías SEM de la muestra #2 (30% zeolita, 20% urea, 30% nitrato de potasio, 20% roca fosfórica).



3.2.4.3. Muestra #20. La Figura 3.9a evidencia una granulometría más uniforme, y la Figura 3.9b muestra los cristales bien definidos (círculos celestes) de esta muestra, probablemente de nitrato de potasio o roca fosfórica, dispersos en la matriz [4], [37]. Estos cristales actúan como fuentes de nutrientes de liberación sostenida [4]. Además, se observan zonas oscuras que corresponden a poros en la estructura de la pastilla (círculos naranjas). Estos poros permiten la absorción controlada de agua, facilitando una liberación gradual de los nutrientes [7], [9]. La capacidad higroscópica elevada y el peso volumétrico moderado de esta muestra se correlacionan con la estructura porosa observada, que permite una absorción de humedad significativa sin comprometer la integridad estructural.

Figura 3.9

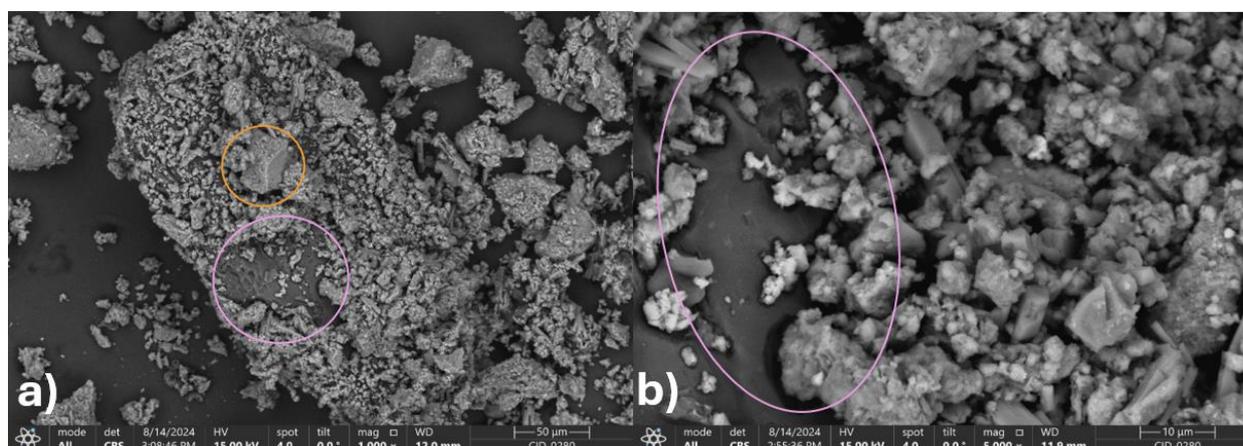
Micrografías SEM de la muestra #20 (36.25% zeolita, 21.25% urea, 21.25% nitrato de potasio, 21.25% roca fosfórica).



3.2.4.4. Muestra #27. En las Figuras 3.10a y b destaca la presencia de un gran agujero (círculo rosa), que es indicativo de una apertura significativa en la estructura de la pastilla. Este espacio podría facilitar la absorción de agua [7], pero también sugiere una posible vulnerabilidad estructural que podría afectar la integridad mecánica de la pastilla. Además, se identificó un fragmento mineral dentro de la matriz (círculo naranja), lo que indica la presencia de un componente mineral no completamente integrado, probablemente roca fosfórica o zeolita [36]. Este fragmento actúa como un núcleo de liberación lenta, liberando nutrientes de manera gradual. Los gránulos observados en la matriz de la pastilla sugieren una distribución homogénea de los componentes.

Figura 3.10

Micrografías SEM de la muestra #27 (40% zeolita, 20% urea, 20% nitrato de potasio, 20% roca fosfórica).



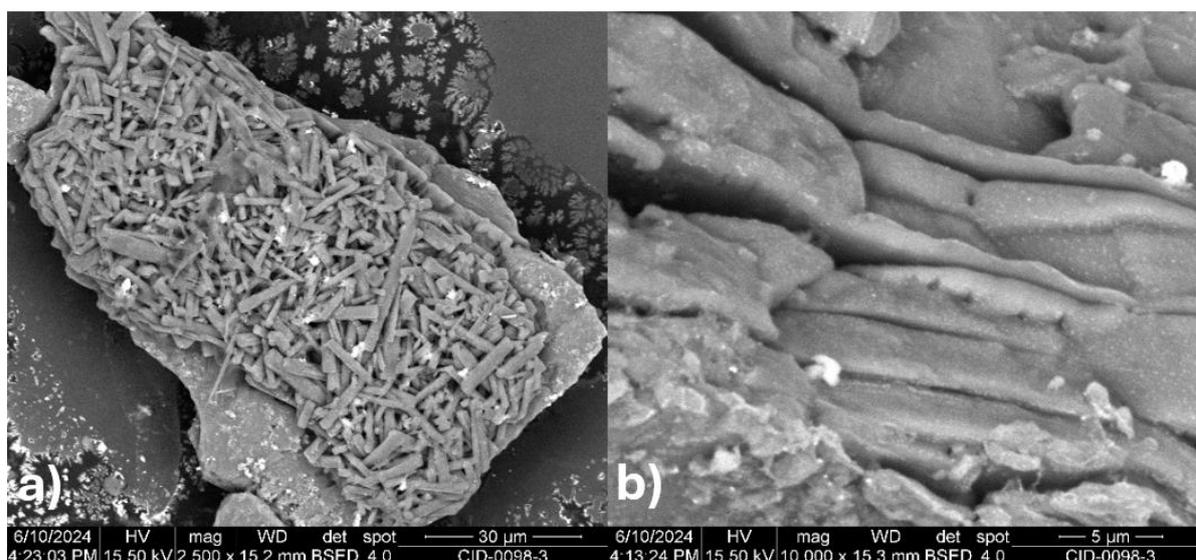
A pesar de las diferencias en la microestructura y la capacidad de liberación de cada pastilla, las tres muestras presentan algunas características en común. El análisis SEM-EDS (Figuras C.2, C.3 y C.4 del Anexo C) de todas las muestras revelan una alta presencia de silicio y oxígeno, elementos clave asociados con la zeolita presente en la formulación de los fertilizantes [6]. Además, todas las muestras presentan una mezcla sólida y porosa, lo que indica que, aunque las muestras varían en su capacidad de liberación, todas están diseñadas para ofrecer un suministro sostenido de nutrientes en diferentes grados [2], [3], [4].

3.2.4.5. F1. La Figura 3.11a exhibe una morfología dominada por una alta concentración de cristales como agujas, que cubren la superficie de las partículas creando una textura rugosa. Estos cristales permiten una disolución inmediata cuando entran en contacto con la humedad del suelo, lo que libera rápidamente los nutrientes [4], [37]. Esta morfología sugiere una mayor área de superficie expuesta, lo que podría facilitar la rápida disolución de los nutrientes en el suelo.

La falta de otros elementos que actúan como agentes controladores sugiere que este fertilizante está destinado a un uso donde se requiere una respuesta rápida del cultivo.

Figura 3.11

Micrografías SEM del fertilizante comercial F1 (liberación rápida).



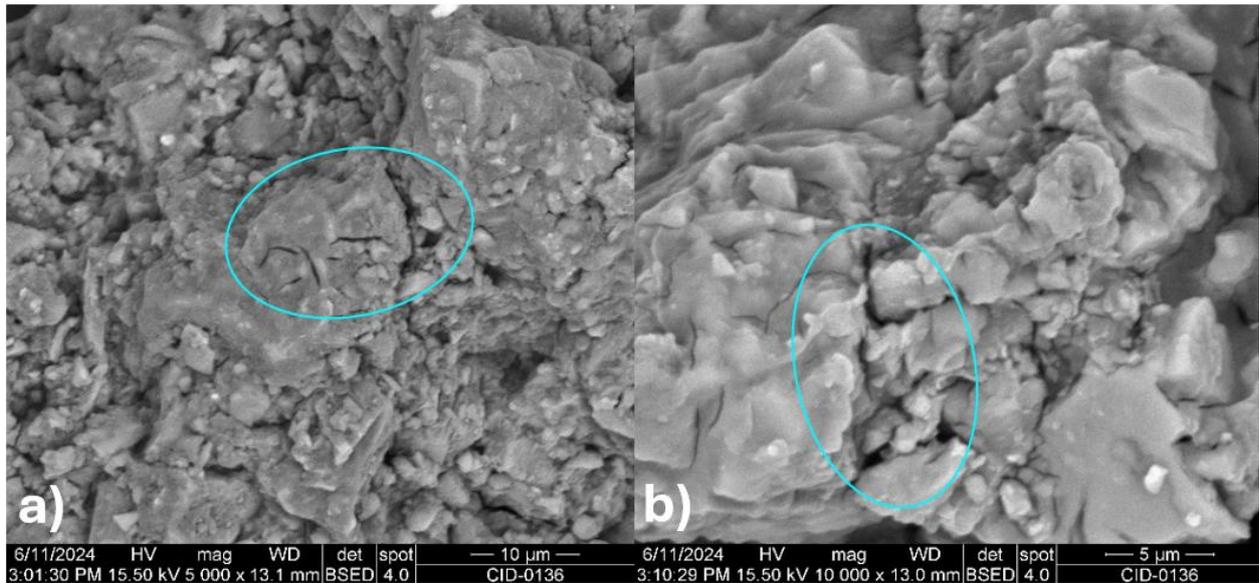
En comparación con los fertilizantes desarrollados en el proyecto, estos, diseñados para liberación lenta, presentan una estructura más cerrada y menos expuesta que el F1. Sin embargo, la muestra #20 comparte algunas similitudes, pues se observan cristales similares formados en su morfología.

3.2.4.6. F2. El fertilizante F2 presenta una morfología densa y compacta en la Figura 3.12a y 3.12b, caracterizada por una matriz sólida con incrustaciones de cristales bien definidos. Las micrografías muestran que en la superficie del fertilizante se observan pequeñas grietas (círculos celestes), lo que sugiere una estructura con cierta porosidad. Estos poros podrían desempeñar un papel en la liberación controlada de los nutrientes, actuando como canales de difusión para el agua y otros agentes disolventes [8].

Dada su estructura porosa y la presencia de cristales en su matriz, sugiere un mecanismo de liberación controlada basado en la difusión. Los poros y grietas en la matriz podrían permitir la entrada de agua, que lentamente disuelve los nutrientes atrapados en el interior, liberándolos de manera gradual. Este mecanismo es típico de fertilizantes diseñados para proporcionar nutrientes de forma sostenida durante un periodo prolongado [1].

Figura 3.12

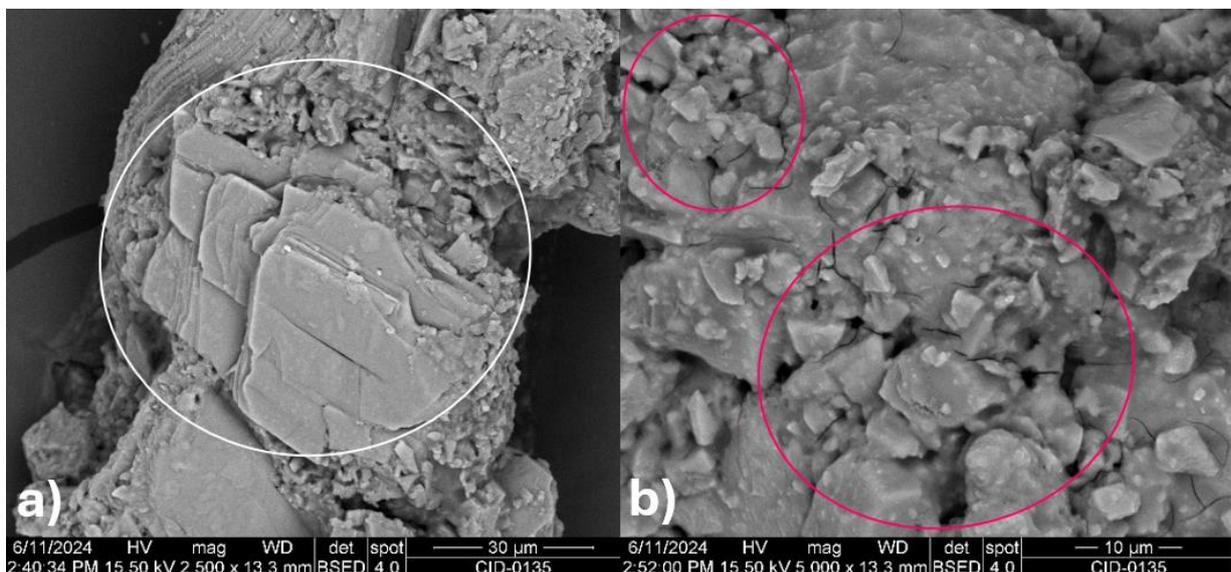
Micrografías SEM del fertilizante comercial F2 (liberación lenta).



3.2.4.7. F3. En la Figura 3.13 se revela una estructura más rugosa y menos uniforme que la de F2, con numerosos poros y cavidades que podrían influir en su comportamiento de liberación (círculos rosados). Las incrustaciones observadas en la superficie (círculo blanco) podrían pertenecer a algún tipo de sal como el sulfato de calcio o magnesio como indica su composición en la Figura C.5 del Anexo C.

Figura 3.13

Micrografías SEM del fertilizante comercial F3.



El F3 distingue por una morfología que incluye tanto partículas planas como cristales incrustados en una matriz compacta. La presencia de estos cristales laminares podría tener un impacto en la liberación de nutrientes, ya que las superficies planas y compactas de estas incrustaciones pueden ralentizar la disolución en el suelo [2], [3].

El mecanismo de liberación del F3 probablemente involucra la disolución controlada de los nutrientes a través de sus poros y cavidades. Los fertilizantes del proyecto, aunque efectivos, muestran una mayor heterogeneidad en la distribución de sus componentes, lo que podría resultar en una liberación menos controlada.

3.3. Selección de muestra con mayor potencial

Para determinar la muestra que continuará en su proceso de diseño y optimización en futuras investigaciones, se evaluaron varios criterios esenciales mediante la matriz de la Tabla 2.3, con cada uno de ellos ponderado según su relevancia en el desempeño del fertilizante.

En la evaluación TDS y el comportamiento de liberación de nutrientes, la muestra #2, como se observa en las Figuras 3.4 y 3.5, mostró una liberación rápida con una cantidad significativa de nutrientes disueltos, seguida de una estabilización sostenida, lo cual es beneficioso para cultivos que requieren un suministro constante. En contraste, la muestra #27, con un TDS menor y una mayor proporción de zeolita, presentó una liberación más lenta y uniforme, adecuada para situaciones donde se prefiere una liberación gradual y prolongada de los nutrientes.

Respecto a la capacidad higroscópica, que mide la capacidad de los fertilizantes para absorber humedad, la Tabla 3.2 indica que la muestra #27 mostró un valor ligeramente inferior, lo que implica una mayor estabilidad en condiciones de alta humedad. Sin embargo, su valor no dista mucho del de la muestra #2.

En la Tabla 3.3, la muestra #2 tuvo el mayor peso volumétrico, lo que indica una mayor estabilidad y cantidad de material por unidad de volumen. La muestra #27, con un peso

volumétrico moderada, denota eficacia en la liberación de nutrientes, pero se busca un peso volumétrico mayor que brinde consistencia en el producto.

Finalmente, la Figura 3.2, que se relaciona con la concentración de nutrientes disponibles, mostró que la muestra #20 tiene una CE relativamente alta, sugiriendo una liberación rápida de nutrientes. Por otro lado, la muestra #27 mostró una CE más baja, reflejando su liberación lenta y sostenida, alineada con la necesidad de una liberación prolongada.

Tabla 3.5

Matriz de decisión con base en los resultados obtenidos

Criterio	Total de sólidos disueltos	Comportamiento de liberación de nutrientes	Baja capacidad higroscópica	Peso volumétrico	Conductividad eléctrica	Σ <i>Final</i>
#2	0.3 x 0.167	0.4 x 0.25	0.05 x 0.375	0.05 x 0.5	0.2 x 0.167	0.2272
#20	0.3 x 0.333	0.4 x 0.375	0.05 x 0.25	0.05 x 0.167	0.2 x 0.333	0.3411
#27	0.3 x 0.5	0.4 x 0.375	0.05 x 0.375	0.05 x 0.333	0.2 x 0.5	0.4354

Al considerar todos estos factores y los pesos establecidos en la matriz de la Tabla 2.3, la muestra #27 emergió como la seleccionada (Tabla 3.5), destacándose por su estabilidad, liberación controlada y facilidad de manejo, lo que la hace ideal para aplicaciones agrícolas que demandan una liberación prolongada y eficiente de nutrientes. Las matrices de decisión por cada criterio se ubican en el Apéndice D.

3.4. Análisis económico

El análisis financiero se enfoca en examinar los flujos de ingresos y egresos, la estructura de costos e indicadores clave de rendimiento que influyen en el éxito del proyecto. En este contexto, se analizan los costos asociados a la producción de pastillas fertilizantes de un gramo a

base de zeolita. La pastilla ganadora fue la muestra #27 como se indicó, por tanto, los precios en esta sección son acorde a la cantidad de componentes que se requieren (ver Tabla 2.1).

3.4.1. Costos operativos

Los componentes necesarios suelen disponerse en el mercado en sacos de 50 kg. Además, se requieren equipos para la producción de las pastillas fertilizantes. Los precios respectivos indagados del mercado se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6

Materiales y equipos requeridos con su costo

Materiales/Equipo	Cantidad	Costo
Zeolita	50 kg	\$10,00
Roca fosfórica	50 kg	\$18,00
Nitrato de potasio	50 kg	\$75,00
Urea	50 kg	\$37,00
Máquina de prensado de pastillas TDP-5	3	\$3.450,60

Debido a las proporciones de la muestra #27 (ver Tabla 2.1), se puede determinar fácilmente que se requerirá el doble de cantidad de zeolita comparado con lo requerido en los otros componentes. Por ejemplo: por cada 100 kg de zeolita solo se requerirán 50 kg de los otros tres componentes. La suma total es 250 kg, convertido ese peso a cantidad de pastillas teniendo en cuenta que cada pastilla tendrá 1 gramo, 250000 unidades se pueden formar.

El producto para comercializar vendrá en empaques de 50 kg. Los precios de la Tabla 3.6 sirven de referencia para la producción de las pastillas y aspectos operativos detallados en la Tabla 3.7. Se establecen dos periodos en el plan de cinco años: El primer periodo corresponde a los dos primeros años, donde cuenta con tres máquinas capaces de producir 32 sacos de 50 kg por mes, lo que implica un gasto total mensual de \$1440.40. En el segundo periodo, que son los

tres años siguientes, se añadieron dos máquinas para incrementar la producción a 53 sacos por mes, incrementando el gasto mensual en \$2094. El precio de venta al público del saco de 50 kg se estableció en \$60 según el costo unitario de la pastilla determinado en la Tabla E.1 del Apéndice E, que es \$0.0006. Con ese precio por saco, se espera tener ingresos mensuales de \$1900.80 en el primer periodo y \$3168 en el segundo, con márgenes de ganancia de 24.22% y 33.90%, respectivamente (ver Apéndice E).

Tabla 3.7

Producción mensual y los gastos asociados

Variable	Valor		Unidades
	1er Período	2do Período	
Productividad por máquina	3,300		Pastillas/hora
Tiempo de producción diaria	8		horas
Días laborales al mes	20		días
Máquinas disponibles	3	5	-
Producción mensual	1 584,000	2 640,000	Pastillas
Sacos de 50 kg mensuales del producto	32	53	Sacos
Precio de venta del saco	\$60.00		USD
Gasto en materiales al mes	\$950.40	\$1,584.00	USD
Gasto en energía eléctrica al mes	\$30	\$50	USD
Mano de obra	\$460		USD
Gasto total mensual	\$1,440.40	\$2,094.00	USD
Ingresos mensuales	\$1,900.80	\$3,168.00	USD
Margen de ganancia	24.22%	33.9%	-

3.4.2. Análisis VAN-TIR

Con la información disponible se realizó el análisis VAN-TIR para evaluar la rentabilidad del proyecto, la Tabla 3.8 muestra todos los valores presentes en el análisis. El proyecto

comienza con una inversión inicial de \$15,000. En el primer año, el efectivo neto es de \$2,594.40 porque se realizaron las compras de las dos máquinas y se inició la producción a mitad del primer mes. En el tercer año, los egresos aumentan en \$10000 aproximadamente respecto al segundo año, porque se compraron dos máquinas más y, por ende, aumentó el gasto en los materiales al incrementar la producción.

La TIR calculada es del 50%, lo cual es superior a la tasa de descuento aplicada, que es del 13.11% [38]. Esto demuestra que el proyecto genera un retorno mayor que el costo del capital. Además, el VAN positivo de \$25,393.80 confirma que el proyecto es viable financieramente, ya que generará un valor adicional por encima de la inversión inicial.

Tabla 3.8

Análisis VAN-TIR del proyecto

Flujo de caja			
Inversión inicial		\$15.000,00	
Año	Egresos	Ingresos	Efectivo Neto
1	\$20.215,20	\$22.809,60	\$2.594,40
2	\$17.484,80	\$23.950,08	\$6.465,28
3	\$27.728,40	\$39.916,80	\$12.188,40
4	\$25.428,00	\$43.908,48	\$18.480,48
5	\$25.808,40	\$50.494,75	\$24.686,35
Tasa de descuento (K)		13,11%	
TIR		50%	Aceptar
VAN		\$25.393,80	Aceptar

3.4.3. *Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)*

Para culminar el análisis financiero, el PRI calculado es de 2 años y 11 meses (ver Tabla E.2 del Apéndice E). En el tercer año, se alcanza un flujo neto acumulado positivo de \$769.10. A partir de este punto, el proyecto no solo recupera la inversión inicial, sino que comienza a generar ganancias netas.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones de este estudio y las recomendaciones con base en el margen de mejora presente.

4.1. Conclusiones

- La zeolita, por su estructura porosa, demostró ser un componente clave en la regulación de la liberación de nutrientes, pues las mezclas que contienen un mayor porcentaje de zeolita presentaron una liberación más lenta de nutrientes. La roca fosfórica presentó una tendencia similar, al presentar cierta resistencia a la solubilidad. Por otro lado, las muestras con un mayor contenido de nitrato de potasio presentaron una mayor solubilidad, lo que indica que un mayor contenido de este compuesto favorece a una liberación más rápida de nutrientes. Estos resultados subrayan la importancia de una cuidadosa selección de los componentes en la formulación de fertilizantes para optimizar su desempeño en función de las condiciones específicas de uso.
- La urea no demostró ninguna influencia en la conductividad eléctrica ni en el total de sólidos disueltos en la disolución del fertilizante en un periodo de 3 horas, lo que podría indicar su limitada capacidad para modificar la solubilidad del fertilizante en medios acuosos en un corto periodo de tiempo. Esto sugiere que la urea, aunque es una fuente importante de nitrógeno, no contribuye significativamente a la liberación inmediata de nutrientes cuando se trata de la solubilidad en agua. Por lo tanto, su papel en la formulación de fertilizantes debe ser considerado principalmente por su valor nutricional a largo plazo más que por su impacto en la solubilidad inmediata.
- El ensayo de comportamiento de liberación reveló que, aunque los resultados fueron inferiores a los de muestras comerciales, los fertilizantes desarrollados tienen un comportamiento similar en la liberación controlada de nutrientes. Esto sugiere que,

aunque se necesita optimización, el desarrollo actual es un buen inicio y base sólida para mejoras en futuras investigaciones.

- La muestra #2 evidenció una morfología compacta, sin embargo, presentó también partículas poco integradas a la matriz y grietas, las cuales pueden contribuir a la disolución acelerada. En la muestra #20 se observó espacios en sus partículas, esto tiene relación con los resultados de capacidad higroscópica y peso volumétrico. La muestra #27 presentó una estructura compacta sin defectos significativos como grietas, sin embargo, contó con fragmentos no incorporados a la matriz que comprometerían su estabilidad a largo plazo, especialmente en condiciones de campo. Estos hallazgos indican que, aunque las muestras tienen potencial, requieren optimización para mejorar su integridad estructural y morfología.
- La muestra #20, con una capacidad higroscópica del 29.2%, demostró una mayor tendencia a absorber humedad en comparación con la muestra #27, que presentó una capacidad higroscópica de solo 17.5%. Estos resultados sugieren que; aunque ambas muestras contienen proporciones similares de zeolita, urea, nitrato de potasio y roca fosfórica; la morfología y distribución interna de los componentes en la muestra #20 favorecen una mayor exposición de las partículas higroscópicas al ambiente, lo que explica su mayor absorción de agua. Este comportamiento indica que factores como la densidad y cantidad de aperturas en su morfología, más allá de la composición química, juegan un papel importante en la capacidad de un fertilizante para absorber humedad. La muestra #20, con un peso volumétrico menor (1.109 g/ml), tiene una superficie más abierta que permite un mayor acceso del agua a sus componentes internos. En contraste, la muestra #27, con un mayor peso volumétrico (1.415 g/ml), puede tener una estructura más compacta que limita esta interacción, resultando en una menor capacidad higroscópica.

- El análisis económico del proyecto indica que, aunque la inversión inicial es considerable, el proyecto muestra una rentabilidad atractiva con un PRI de aproximadamente 2 años y 11 meses. Además, el VAN positivo y una TIR del 50% confirman la viabilidad financiera del proyecto, superando significativamente la tasa de descuento aplicada. Estos resultados sugieren que, a pesar de los costos operativos y de producción, el proyecto tiene el potencial de generar beneficios sostenibles a largo plazo, posicionándose como una opción económicamente viable y competitiva en el mercado de fertilizantes de liberación lenta.

4.2. Recomendaciones

- Debido a que a mayor proporción de zeolita y roca fosfórica la disolución del fertilizante disminuye en el agua, se recomienda realizar estudios adicionales para encontrar la proporción óptima de componentes, teniendo en cuenta el balance entre solubilidad y liberación controlada de nutrientes, adaptando los fertilizantes a las necesidades específicas de distintos cultivos y condiciones de suelo.
- Dado que la urea no mostró un impacto significativo en la solubilidad a corto plazo, se recomienda realizar ensayos enfocados en su contribución a la liberación de nutrientes a largo plazo y cómo su liberación gradual puede ser optimizada en combinación con otros componentes, considerando también su estabilidad durante el almacenamiento. Además, sería interesante analizar el comportamiento de liberación del fertilizante replicando estos ensayos bajo las mismas condiciones, con la única diferencia de no contar con urea en la composición de las muestras.
- Dado que las muestras presentaron grietas y partículas mal integradas en su matriz, es recomendable optimizar el proceso de fabricación para mejorar la cohesión de los componentes y reducir la aparición de defectos que puedan comprometer la estabilidad y

eficacia del fertilizante. Compactación por agitación o la incorporación de aglutinantes podrían ser exploradas.

- Se sugiere incluir modificaciones en el proceso de secado o la utilización de aglutinantes que regulen la capacidad higroscópica, porosidad y densidad para tener un mayor control en estas propiedades, y de esta forma, balancear la absorción de humedad con la estabilidad estructural.
- Para identificar y cuantificar los iones específicos liberados, se recomienda utilizar técnicas de caracterización como la espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Este análisis permitirá comprender mejor la dinámica de liberación de nutrientes, proporcionando datos útiles para ajustar las formulaciones y mejorar la eficacia de los fertilizantes en aplicaciones agrícolas específicas.
- Como una de las siguientes etapas de esta investigación, se sugiere realizar pruebas de campo a gran escala para evaluar el rendimiento agronómico de los fertilizantes bajo diferentes condiciones ambientales y de cultivo. Esto ayudará a validar los resultados de laboratorio y ajustar las formulaciones para su uso práctico en diversas aplicaciones agrícolas.

REFERENCIAS

- [1] M. Reháková, S. Čuvanová, M. Dzivák, J. Rimár, and Z. Gaval'ová, "Agricultural and agrochemical uses of natural zeolite of the clinoptilolite type," *Curr Opin Solid State Mater Sci*, vol. 8, no. 6, pp. 397–404, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.cossms.2005.04.004.
- [2] I. M. S. Souza *et al.*, "The use of clinoptilolite as carrier of nitrogened fertilizer with controlled release," *J Environ Chem Eng*, vol. 6, no. 4, pp. 4171–4177, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jece.2018.06.017.
- [3] T. E. Agustina, I. Rizky, M. E. W. Utama, and M. I. Amal, "Characterization and utilization of zeolite for NPK slow release fertilizer," *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 31, no. 4, pp. 622–628, Apr. 2018, doi: 10.5829/ije.2018.31.04a.14.
- [4] P. Hoeung, Y. Bindar, and S. P. Senda, "Development of granular urea-zeolite slow release fertilizer using inclined pan granulator," *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, vol. 10, no. 2, p. 95, Oct. 2018, doi: 10.5614/jtki.2011.10.2.6.
- [5] Horizon Distributors - Irrigation & Landscape Supply, "FERTILIZER PRICES VS THE TRUE COST OF FERTILIZER." Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.horizononline.com/fertilizer-prices-vs-true-cost-of-fertilizer/>
- [6] C. Woodford, "Zeolites," Explain That Stuff. Accessed: May 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.explainthatstuff.com/zeolites.html>
- [7] M. Król, "Natural vs. Synthetic Zeolites," *Crystals (Basel)*, vol. 10, no. 7, p. 622, Jul. 2020, doi: 10.3390/cryst10070622.
- [8] N. Kordala and M. Wyszowski, "Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications," *Molecules*, vol. 29, no. 5, p. 1069, Feb. 2024, doi: 10.3390/molecules29051069.
- [9] ZEONATEC, "Zeolita," ZEONATEC. Accessed: May 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.zeonatec.com/zeolita>
- [10] T. Derbe, S. Temesgen, and M. Bitew, "A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, pp. 1–17, Sep. 2021, doi: 10.1155/2021/6637898.
- [11] Y. Besset-Manzoni, L. Rieusset, P. Joly, G. Comte, and C. Prigent-Combaret, "Exploiting rhizosphere microbial cooperation for developing sustainable agriculture strategies," Oct. 01, 2018, *Springer Verlag*. doi: 10.1007/s11356-017-1152-2.

- [12] V. M. Lapushkin, A. A. Lapushkina, and S. P. Torshin, "Effect of coated urea and NPK-fertilizers on spring wheat yield and nitrogen use efficiency," *Braz J Biol*, vol. 84, p. e279269, 2024, doi: 10.1590/1519-6984.279269.
- [13] J. Oliet *et al.*, "LOS FERTILIZANTES DE LIBERACION CONTROLADA LENTA APLICADOS A LA PRODUCCION DE PLANTA FORESTAL DE VIVERO. EFECTO DE DOSIS Y FORMULACIONES SOBRE LA CALIDAD DE *Pinus halepensis* mill."
- [14] M. Soca and M. Constanza Daza-Torres, "EVALUACIÓN DE FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS Y DOSIS DE ZEOLITA PARA LA AGRICULTURA EVALUATION OF PARTICLE SIZE FRACTIONS AND DOSES OF ZEOLITE FOR AGRICULTURE," 2016. Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1262>
- [15] R. Leardi, "Experimental design in chemistry: A tutorial," *Anal Chim Acta*, vol. 652, no. 1–2, pp. 161–172, 2009, doi: 10.1016/j.aca.2009.06.015.
- [16] Cornell University, "FERTILIZER RELEASE MECHANISMS AND TIME UNTIL RELEASE," New York, Apr. 2013.
- [17] P. E., S. Sarkar, and P. K. Maji, "A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability," *J Environ Chem Eng*, vol. 12, no. 4, p. 113211, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jece.2024.113211.
- [18] Tel Aviv University, "Conductivity Theory and Practice," in *Analytical Radiometer*, vol. D61M002, 2004, pp. 1–50. [Online]. Available: <https://www.tau.ac.il/~chemlaba/Files/Theoryconductivity.pdf>
- [19] J. Rodríguez and E. Giménez, "Aplicación del análisis de componentes principales en la investigación de aguas de pozo para el consumo humano.," *Población y Desarrollo*, vol. 23, no. 45, pp. 38–52, 2017, doi: 10.18004/pdfce/2076-054x/2017.023(45).038-052.
- [20] "The Basic Properties of Building Materials," in *Building Materials in Civil Engineering*, Elsevier, 2011, pp. 7–423. doi: 10.1533/9781845699567.7.
- [21] S. Prabhu S, K. Natesan, and N. S. Nayak, "Effects of thermal treatments on characteristics and morphological variations in the deposits of urea-SCR systems," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 40, pp. 56711–56726, Oct. 2021, doi: 10.1007/s11356-021-14057-4.
- [22] S. Barbi, F. Barbieri, F. Andreola, I. Lancellotti, L. Barbieri, and M. Montorsi, "Preliminary study on sustainable NPK slow-release fertilizers based on byproducts and leftovers: A design-of-experiment approach," *ACS Omega*, vol. 5, no. 42, pp. 27154–27163, 2020, doi: 10.1021/acsomega.0c03082.

- [23] P. Dayal, S. Ranjan, M. Ghosh, and S. Kumar, “Innovations in Nutrient Management : Improving Efficiency and Crop Production,” no. October, 2023.
- [24] Q. Duan *et al.*, “Fabrication, evaluation methodologies and models of slow-release fertilizers: A review,” *Ind Crops Prod*, vol. 192, no. September 2022, 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.116075.
- [25] J. D. Bolaños-Alfaro, G. Cordero-Castro, and G. Segura-Araya, “Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica),” *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 30, no. 4, p. 15, 2017, doi: 10.18845/tm.v30i4.3408.
- [26] K. D. Jacob, W. L. Hill, H. L. Marshall, and D. S. Reynolds, “The composition and distribution of phosphate rock with special reference to the United States,” *United States Department of Agriculture*, p. 18, 1933, [Online]. Available: file:///F:/Spec 2/Traffic Delay Model.pdf
- [27] Rizka Fitria Utami, Khoirunnisa Amartya Octaviani, Berliana Tristati Putri, and Jayanudin, “Utilization of zeolite and humic acid in modification of slow-release urea,” *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 465–469, 2022, doi: 10.30574/wjarr.2022.14.1.0322.
- [28] J. E. D. Ortiz, “Propuesta metodológica para determinar el potencial de humedad de un material granular a partir de la humedad relativa.,” *Ingeniería y Competitividad*, vol. 7, no. 1, pp. 73–79, 2005, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323470007>
- [29] J. Fulton and K. Port, “Physical Properties of Granular Fertilizers and Impact on Spreading,” *Ohioline: Ohio State University Extension*. Accessed: Aug. 03, 2024. [Online]. Available: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-5501>
- [30] FERTIMAX, “Triple 16,” 2016. [Online]. Available: [https://fertimax.com.mx/ft/FICHA TECNICA TRIPLE 16 \(16-16-16\).pdf](https://fertimax.com.mx/ft/FICHA TECNICA TRIPLE 16 (16-16-16).pdf)
- [31] TIGSA, “FICHA TÉCNICA GRANUMAX 2.1,” 2016. [Online]. Available: <https://agrolink.ec/wp-content/uploads/2021/02/GRANUMAX-2.1-2.pdf>
- [32] TIGSA, “FICHA TÉCNICA GRANUMAX 2.1S,” 2011. [Online]. Available: <https://www.ftepeyac.com.mx/wp-content/uploads/2019/09/Granumax-ficha-tecnica.pdf>
- [33] A. Munawar, D. Mulyanto, and R. R. D. Asrifah, “Physical Characterisation of a Natural Zeolite using a Scanning Electron Microscopy: A Preliminary Study,” *RSF Conference Series: Engineering and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 510–513, Dec. 2021, doi: 10.31098/cset.v1i1.422.

- [34] H. R. AlGhuri, H. A. Aziz, H. M. Zwain, and A. F. M. Noor, "Treatment of Landfill Leachate by Heterogeneous Catalytic Ozonation with Granular Faujasite Zeolite," *Environ Eng Sci*, vol. 38, no. 7, pp. 635–644, Jul. 2021, doi: 10.1089/ees.2020.0233.
- [35] E. Wibowo, Sutisna, M. Rokhmat, R. Murniati, Khairurrijal, and M. Abdullah, "Utilization of Natural Zeolite as Sorbent Material for Seawater Desalination," *Procedia Eng*, vol. 170, pp. 8–13, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.002.
- [36] R. Maharana, A. Basu, N. K. Dhal, and T. Adak, "Biosolubilization of rock phosphate by *Pleurotus ostreatus* with brewery sludge and its effect on the growth of maize (*Zea mays* L.)," *J Plant Nutr*, vol. 44, no. 3, pp. 395–410, Feb. 2021, doi: 10.1080/01904167.2020.1822397.
- [37] Q. Mao, N. Liu, L. Peng, and H. Wu, "Investigation on Microstructure of Potassium Nitrate/Sodium Nitrate Composites for Solar Storage System," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2019, pp. 1–5, Feb. 2019, doi: 10.1155/2019/5750270.
- [38] Banco Central del Ecuador, "TASAS DE INTERÉS ACTIVAS EFECTIVAS REFERENCIALES (AGOSTO 2024)."

APÉNDICES

Apéndice A. Resultados del test de liberación de nutrientes (ppm) y en conductividad eléctrica (uS/cm) en periodos de 0, 90 y 180 minutos.

Tabla A.1

Resultados del test de liberación de nutrientes (ppm) en periodos de 0, 90 y 180 minutos. Los valores resaltados fueron aquellos de las muestras seleccionadas.

# de muestra	0 [min]	90 [min]	180 [min]
1	20	1435	1439.33
2	10	1857	1990.33
3	30	1014	1313.33
4	20	978	1221.00
5	79	917	1119.00
6	80	926	1269.67
7	15	1112	1352.33
8	11	1035	1406.00
9	15	812	1247.00
10	5	1073	1115.00
11	5	1503	1507.00
12	5	1511	1791.00
13	5	988	1172.00
14	9	1363	1598.00
15	7	1605	1962.33
16	3	1110	1365.00
17	4	1277	1584.33
18	20	887	1182.33
19	7	1048	1362.33
20	5	1053	1290.00
21	7	920	1136.00
22	3	1405	1466.00
23	6	924	1125.33
24	14	840	1120.67
25	9	885	1278.00
26	5	913	1064.67
27	19	788	1059.67

Tabla A.2

Resultados del test de liberación de nutrientes en $\mu\text{S}/\text{cm}$ en periodos de 0, 90 y 180 minutos.

# de muestra	0 [min]	90 [min]	180 [min]
1	44	2800	2875.33
2	4	3654	4028.67
3	32	2038	2658.67
4	32	1956	2367.33
5	160	1825	2256.00
6	156	1830	2552.67
7	28	2236	2694.00
8	30	2070	2846.67
9	22	1640	2494.00
10	10	2100	2223.33
11	10	2100	3022.67
12	8	3022	3616.67
13	6	2014	2526.00
14	16	2726	3158.00
15	32	3180	4016.00
16	6	2232	2730.67
17	8	2342	3164.67
18	24	1774	2364.00
19	16	2096	2721.33
20	10	2190	2575.33
21	26	1824	2282.67
22	4	2320	2961.33
23	19	1924	2290.00
24	22	1746	2243.33
25	6	1910	2556.67
26	8	1830	2129.33
27	50	1580	2074.67

Apéndice B. Resultados de los ensayos.

Tabla B.1

Resultados de las mediciones de capacidad higroscópica en las muestras

N° medición	#2	#20	#27	F1	F2	F3
Masa inicial [g]						
1	0,805	1,021	1,051	1,046	0,995	1,035
2	0,706	0,884	0,957	1,036	1,016	1,050
3	0,875	1,024	0,974	1,083	0,996	1,005
Promedio	0,795	0,976	0,994	1,055	1,002	1,030
Masa final [g]						
1	0,997	1,357	1,283	1,141	1,016	1,047
2	0,872	1,347	1,172	1,192	1,070	1,063
3	1,032	1,431	1,160	1,204	1,037	1,017
Promedio	0,967	1,378	1,205	1,179	1,041	1,042
Agua absorbida [g]						
1	0,192	0,336	0,232	0,095	0,020	0,012
2	0,166	0,464	0,215	0,156	0,054	0,012
3	0,157	0,407	0,186	0,121	0,041	0,012
Promedio	0,171	0,402	0,211	0,124	0,038	0,012
Capacidad higroscópica [% p/p]						
Promedio	17,7%	29,2%	17,5%	10,5%	3,7%	1,2%

Tabla B.2*Resultados de las mediciones de peso volumétrico en las muestras*

N° medición	#2	#20	#27
Masa [g]			
1	0,805	1,021	1,051
2	0,706	0,884	0,957
3	0,875	1,024	0,974
Promedio	0,795	0,976	0,994
Volumen [ml]			
1	0,750	1,600	0,600
2	0,500	0,900	0,800
3	0,450	0,600	0,750
Promedio	0,567	1,033	0,717
Peso volumétrico [g/ml]			
1	1,073	0,638	1,752
2	1,412	0,982	1,196
3	1,945	1,707	1,299
Promedio	1,477	1,109	1,415

Apéndice C. Caracterización SEM-EDS

Las figuras a continuación son caracterización SEM-EDS de los componentes usados para la elaboración del fertilizante.

Figura C.1

EDS de la zeolita: Micrografía de magnitud 2500x, Espectro EDS y la Tabla de composición. La tabla adjunta al espectro muestra los porcentajes en peso y los errores asociados, indicando que las mediciones son relativamente precisas.

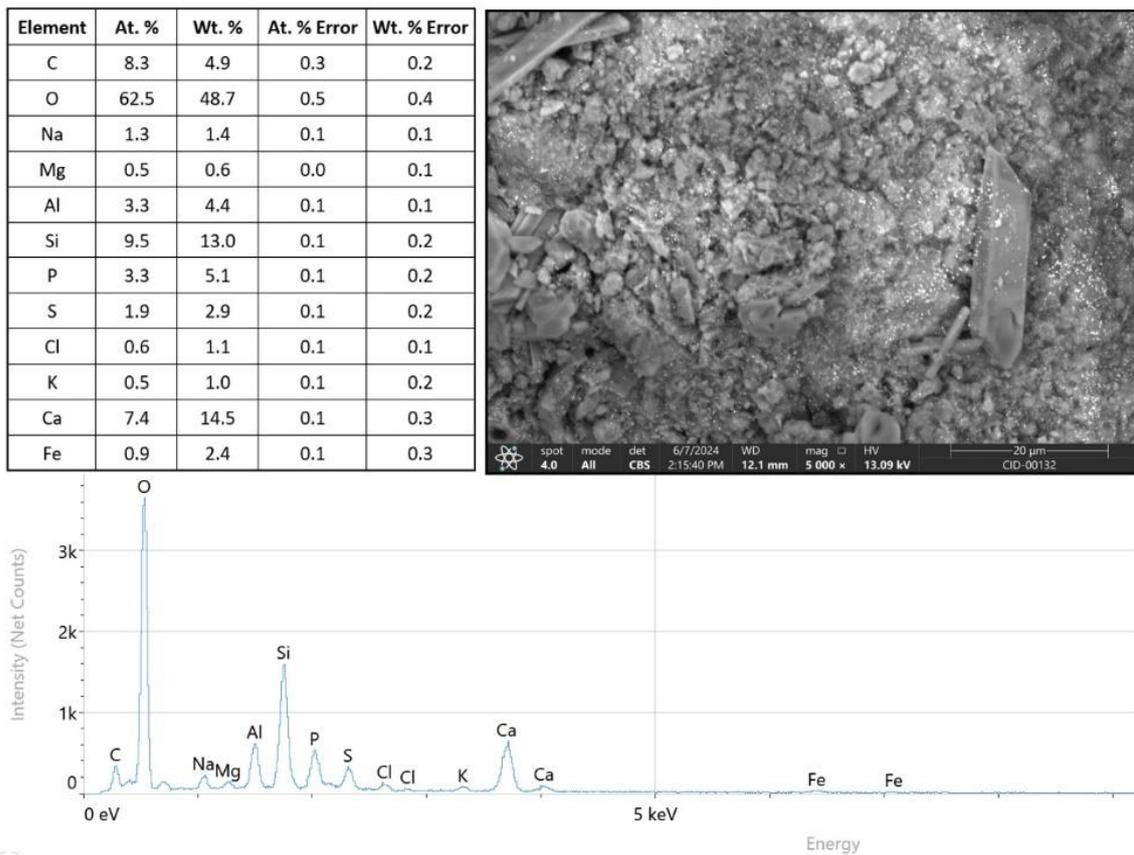


Figura C.2

EDS de la Muestra #2: Micrografía de magnitud 5000x, Espectro EDS y la Tabla de composición. La tabla adjunta al espectro muestra los porcentajes en peso y los errores asociados, indicando que las mediciones son relativamente precisas.

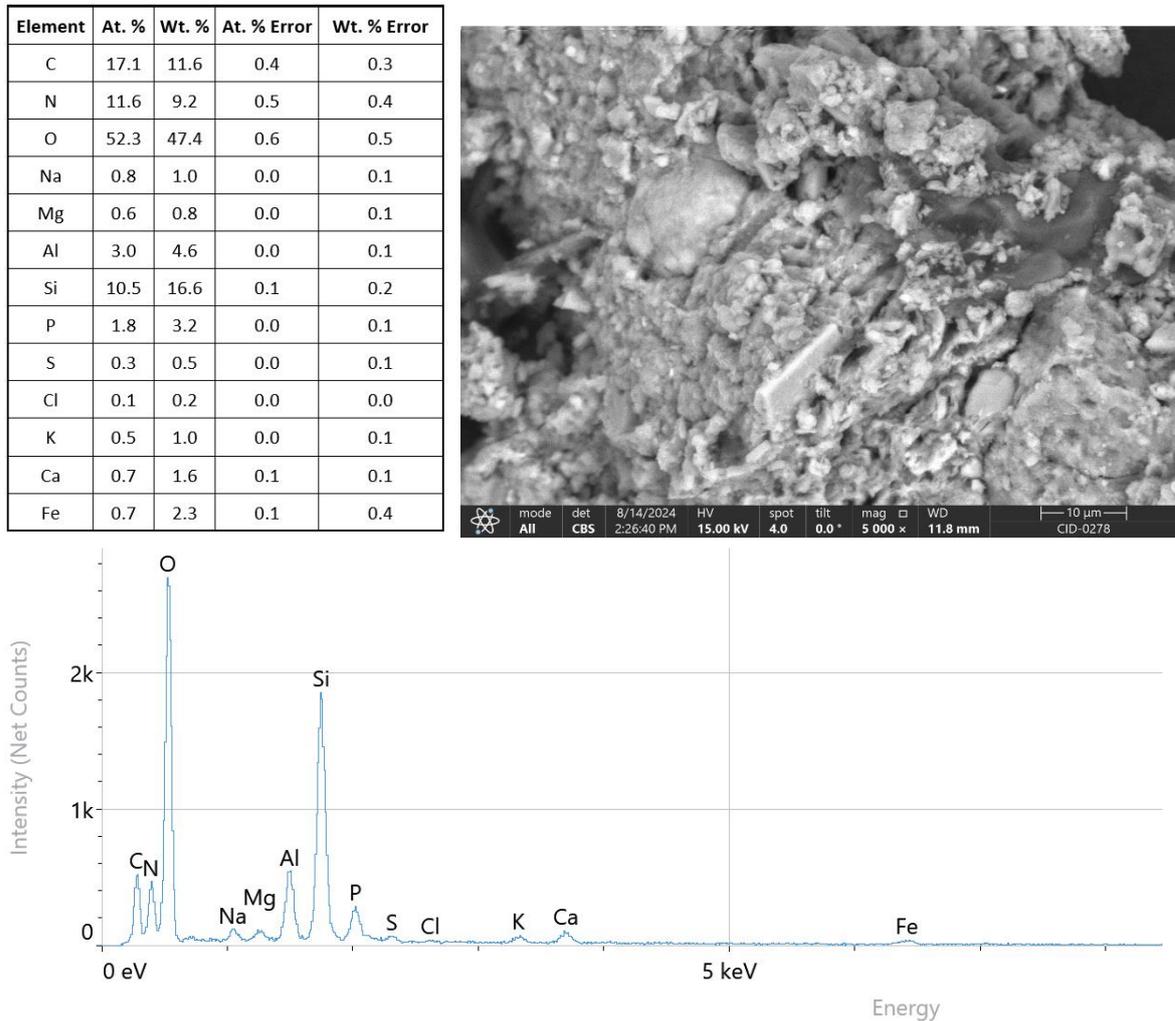


Figura C.3

EDS de la Muestra #20: Micrografía de magnitud 5000x, Espectro EDS y la Tabla de composición. La tabla adjunta al espectro muestra los porcentajes en peso y los errores asociados, indicando que las mediciones son relativamente precisas.

Element	At. %	Wt. %	At. % Error	Wt. % Error
C	13.2	8.9	0.4	0.3
N	12.5	9.8	0.7	0.5
O	55.3	49.6	0.6	0.5
Na	0.4	0.6	0.1	0.1
Mg	0.3	0.4	0.0	0.1
Al	2.4	3.7	0.1	0.1
Si	12.2	19.2	0.1	0.2
P	1.7	2.9	0.1	0.2
S	0.3	0.6	0.1	0.1
K	0.3	0.8	0.0	0.1
Ca	0.8	1.7	0.1	0.1
Fe	0.6	1.8	0.1	0.2

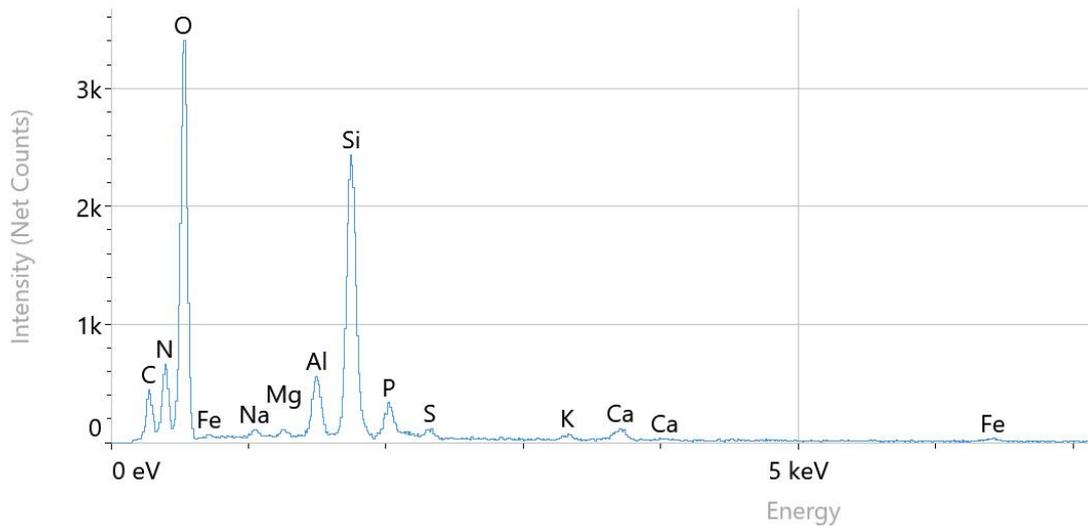
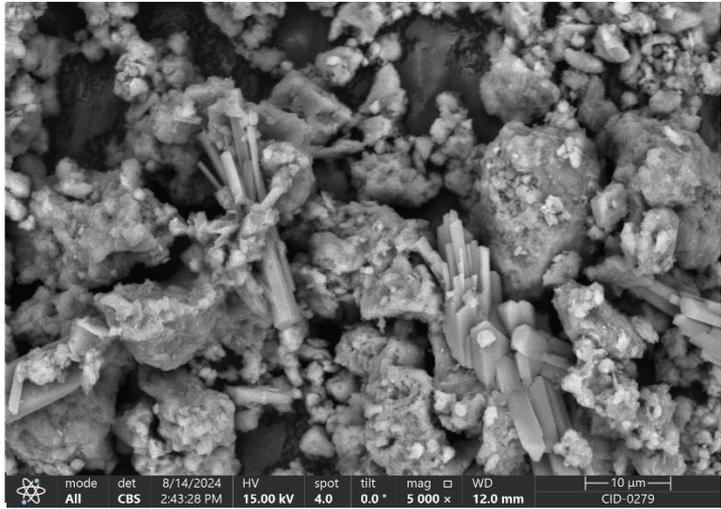


Figura C.4

EDS de la Muestra #27: Micrografía de magnitud 5000x, Espectro EDS y la Tabla de composición. La tabla adjunta al espectro muestra los porcentajes en peso y los errores asociados, indicando que las mediciones son relativamente precisas.

Element	At. %	Wt. %	At. % Error	Wt. % Error
C	14.0	9.7	0.6	0.4
N	13.9	11.3	0.5	0.4
O	56.5	52.2	0.7	0.7
Na	0.5	0.7	0.0	0.1
Mg	0.4	0.5	0.0	0.1
Al	2.1	3.3	0.0	0.1
Si	10.4	17.0	0.1	0.2
P	1.0	1.9	0.0	0.1
S	0.1	0.3	0.0	0.0
K	0.2	0.6	0.0	0.1
Ca	0.5	1.2	0.0	0.1
Fe	0.4	1.3	0.0	0.1

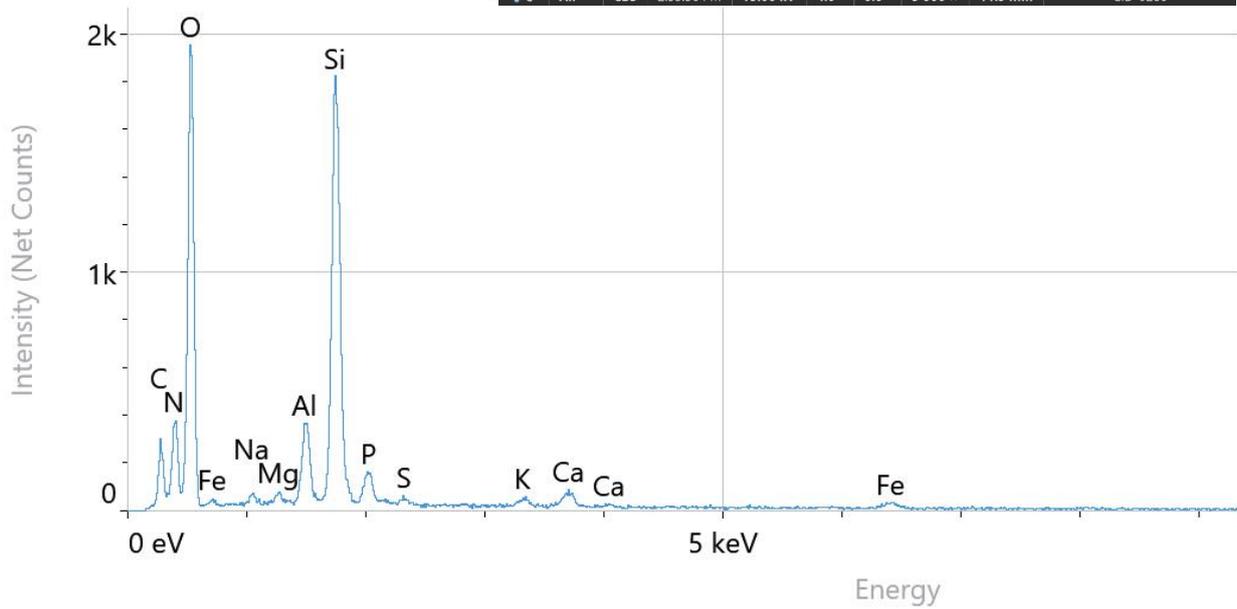
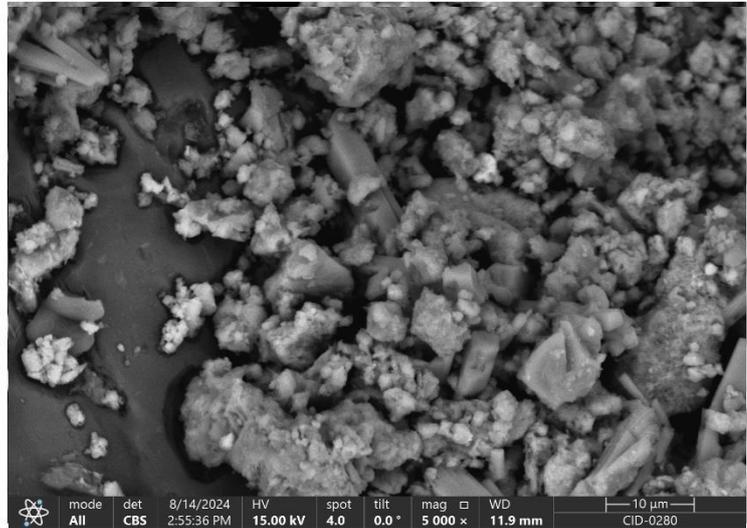
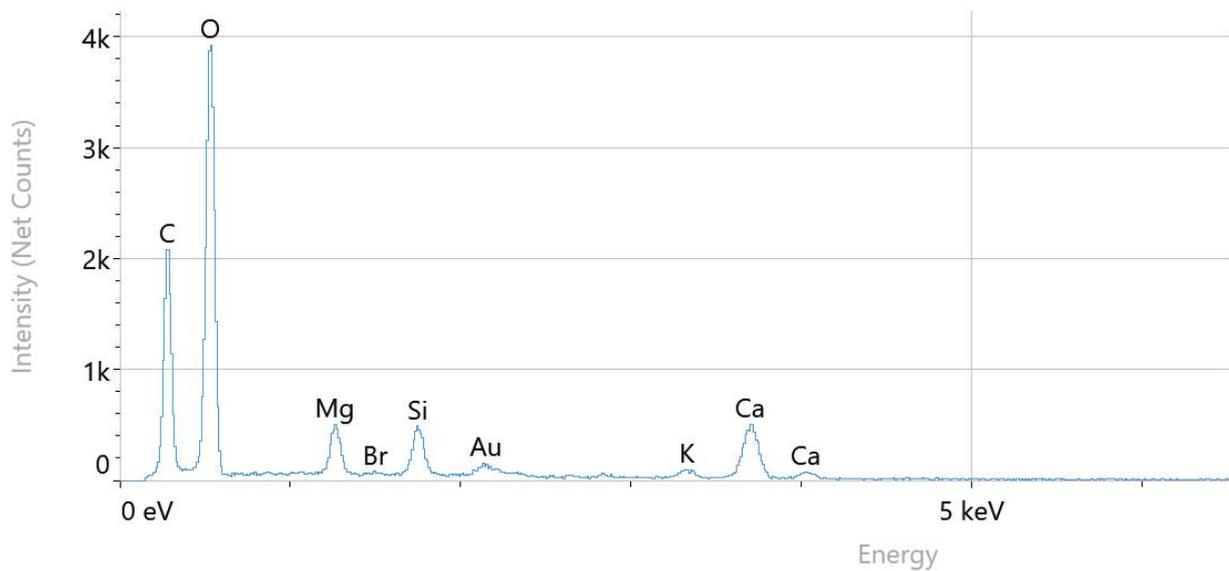
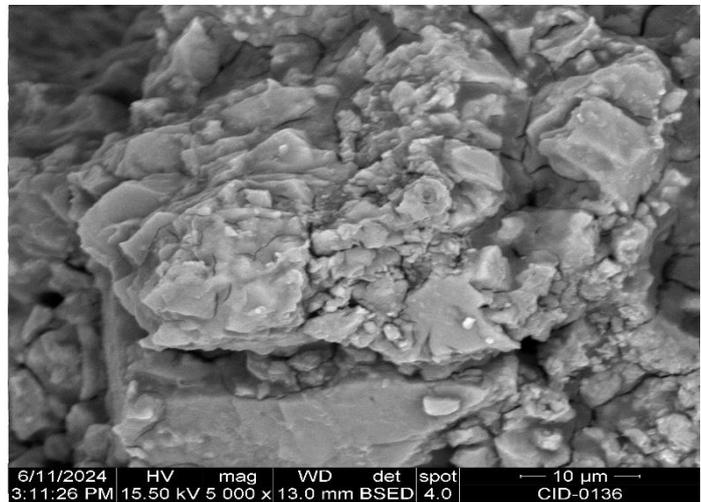


Figura C.5

EDS de F2: Micrografía de magnitud 5000x, Espectro EDS y la Tabla de composición. La tabla adjunta al espectro muestra los porcentajes en peso y los errores asociados, indicando que las mediciones son relativamente precisas.

Element	At. %	Wt. %	At. % Error	Wt. % Error
C	26.6	18.2	0.3	0.2
O	61.4	56.2	0.5	0.5
Mg	2.8	3.9	0.1	0.1
Si	2.4	3.9	0.1	0.1
K	0.8	1.7	0.0	0.1
Ca	5.7	13.0	0.1	0.3
Br	0.1	0.3	0.0	0.1
Au	0.2	2.8	0.0	0.3



Apéndice D. Matrices de decisión

Tabla D.1 *Matriz alternativas-alternativas para el criterio Total de sólidos disueltos (ppm).*

Total de sólidos disueltos [ppm]	#2	#20	#27	\sum_{+1}	Ponderación
#2		0	0	1	0.167
#20	1		0	2	0.333
#27	1	1		3	0.5
TOTAL				6	1

Tabla D.2 *Matriz alternativas-alternativas para el criterio Comportamiento de liberación de nutrientes.*

Comportamiento de liberación	#2	#20	#27	\sum_{+1}	Ponderación
#2		0	0	1	0.25
#20	1		0.5	1.5	0.375
#27	1	0.5		1.5	0.375
TOTAL				4	1

Tabla D.3 *Matriz alternativas-alternativas para el criterio Baja capacidad higroscópica.*

Baja capacidad higroscópica	#2	#20	#27	\sum_{+1}	Ponderación
#2		1	0.5	1.5	0.375
#20	0		0	1	0.25
#27	0.5	1		1.5	0.375
TOTAL				4	1

Tabla D.4 *Matriz alternativas-alternativas para el criterio Peso volumétrico.*

Peso volumétrico	#2	#20	#27	\sum_{+1}	Ponderación
#2		1	1	3	0.5
#20	0		0	1	0.167
#27	0	1		2	0.333
TOTAL				6	1

Tabla D.5 *Matriz alternativas-alternativas para el criterio Conductividad eléctrica.*

Conductividad eléctrica	#2	#20	#27	$\sum +1$	Ponderación
#2		0	0	1	0.167
#20	1		0	2	0.333
#27	1	1		3	0.5
TOTAL				6	1

Apéndice E. Información de análisis económico

Tabla E.1 Precio estimado de la pastilla según su composición y precios del mercado

Materiales	Peso (kg)	Costo	Sacos totales de 50 kg	Peso total (g)	Precio total
Zeolita	50	\$10,00	2	100000	\$20,00
Roca fosfórica	50	\$18,00	1	50000	\$18,00
Nitrato de potasio	50	\$75,00	1	50000	\$75,00
Urea	50	\$37,00	1	50000	\$37,00
Total				250000	\$150,00
Precio unitario de cada pastilla fertilizante				\$0,0006	

Tabla E.2 Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

Años	Flujos Netos	Flujos N. Descontados	Flujo Neto Acumulado
0	-\$15.000,00	-\$15.000,00	-\$15.000,00
1	\$2.594,00	\$2.293,34	-\$12.706,66
2	\$6.465,00	\$5.053,20	-\$7.653,46
3	\$12.188,40	\$8.422,55	\$769,10
4	\$18.480,48	\$11.290,40	\$12.059,49
5	\$24.686,35	\$13.333,74	\$25.393,23
PRI	Años		2
	Meses		11

Margen de ganancia

- **Primer periodo:** El costo de cada saco es de \$45.47. Se obtiene dividiendo los \$1440.40 de gasto mensual para 32, que representa los sacos producidos por mes.

$$\begin{aligned} \text{Margen de ganacia} &= \frac{\text{Precio de venta} - \text{Coste de producto}}{\text{Precio de venta}} \times 100 \\ &= \frac{60 - 45.47}{60} \times 100 = 24.22\% \end{aligned}$$

- *Segundo periodo:* El costo de cada saco es de \$39.66. Se obtiene dividiendo los \$2094 de gasto mensual para 53, que representa los sacos producidos por mes.

$$\text{Margen de ganacia} = \frac{60 - 39.66}{60} \times 100 = 33.90\%$$