

**OBTENCIÓN DE FERTILIZANTE FOSFATADO, A PARTIR DE
ACIDULACIÓN PARCIAL, UTILIZANDO COMO FUENTE DE
FÓSFORO LA ROCA FOSFÓRICA DE FOSFONORTE S.A.**

DANIELLA MRAD SUAREZ

Trabajo presentado para optar por el título de: Ingeniero químico.

Director

FABIAN DAGNOBER RICARDO LOPEZ

Ingeniero Químico.

INGENIERIA QUIMICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL, QUIMICA Y AMBIENTAL

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, 22 de julio del 2019.

Resumen

La disponibilidad de la roca fosfórica, y su potencial uso como fertilizante, son el objeto de este estudio.

Se realizaron pruebas a nivel de laboratorio con el fin de evaluar un proceso óptimo para la obtención de un fertilizante fosfatado y enriquecido. Enfocando la línea de producción hacia la producción de superfosfato, y nitrofosfato.

Se tomó la roca fosfórica como fuente de fósforo y calcio, y se llevó a cabo una acidulación parcial, teniendo en cuenta los principios estequiométricos de la reacción según el ácido fuerte que se utilizó, en este caso ácido fosfórico (H_3PO_4), y ácido nítrico (HNO_3). Se sometió la roca a diferentes concentraciones de ácido, con el fin de elevar los niveles de fósforo total, fósforo asimilable y nitrógeno, según requerimientos del suelo; además de elevar el pH. Posteriormente se estudió el tiempo óptimo de curado, teniendo en cuenta que este es necesario para que la reacción se lleve a cabo completamente; esto se hizo enviando muestras periódicamente a análisis de laboratorio, para el estudio de la evolución en el incremento de los niveles antes mencionados. Con la metodología antes mencionada, se logró estandarizar un proceso de producción.

Los resultados mostraron que los productos obtenidos, son similares a los existentes en el mercado, en cuanto a los niveles de estudio decretados. El producto con más altos niveles logrado; fue 35% P_2O_5 total y 34% P_2O_5 asimilable; es decir más del 98% de solubilización.

Por último, se realizó una evaluación de la eficiencia agronómica del producto obtenido, en un suelo ácido de la región con una planta indicadora, en este caso el maíz. Esto con el fin de realizar una comparación en el proceso de crecimiento de la misma planta, pero sin ningún tipo de fertilizante. El resultado fue el esperado ya que la eficiencia del producto obtenido hizo notar una

gran diferencia en el periodo vegetativo de la planta, producción de grano, estabilidad de tallo, etc.

De esta manera, se dio el visto bueno al proyecto por parte de la empresa, dándole paso a la evaluación del diseño para la construcción de la planta de acidulación de roca fosfórica.

Palabras claves: *Roca fosfórica, acidulación parcial, fertilizante, nutrientes.*

ABSTRACT

The availability of phosphate rock, and its potential use as fertilizer, are the object of this study.

Tests were carried out at the laboratory level in order to evaluate an optimal process for obtaining a phosphatized and enriched fertilizer. Focusing the production line towards obtaining triple superphosphate, and nitrophosphate.

It's about phosphate rock as the source of phosphorus and calcium, and a partial acidulation was carried out taking into account the stoichiometric principles of the reaction, according to the strong acid that was used, in this case phosphoric acid (H_3PO_4), and nitric acid (HNO_3). The rock was subjected to different concentrations of acid, in order to raise the levels of total phosphorus, assimilable phosphorus and nitrogen, according to soil requirements; in addition to raising the pH. Subsequently, the optimum curing time was studied, bearing in mind that this is necessary for the reaction to be carried out completely; This was done by sending samples periodically to laboratory analysis, to study the evolution in the increase of the aforementioned levels. With the aforementioned methodology, a production process was standardized.

The results showed that the products obtained are similar to those existing in the market, in terms of the levels of study decreed. The product with the highest levels achieved; it was 35% total P_2O_5 and 34% P_2O_5 assimilable; that is, more than 98% solubilization.

Finally, an evaluation was made of the agronomic efficiency of the product obtained, in an acid soil of the region with an indicator plant, in this case corn. This in order to make a comparison in the growth process of the same plant, but without any fertilizer. The result was the expected one

since the efficiency of the obtained product point out a great difference in the vegetative period of the plant, production of grain, stability of stem, etc.

In this way, the project was approved by the company, giving way to the evaluation of the design for the construction of the phosphoric rock acidification plant.

Keywords: Phosphoric rock, partial acidification, fertilizer, nutrients.

Tabla de contenidos

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.	3
Capítulo 2 Marco Teórico	4
Capítulo 3 Metodología	9
3.1 Roca fosfórica.	9
3.2 Revisión de la bibliografía.....	10
3.3 Caracterización física y química de la roca fosfórica.	11
3.4 Ataque con ácido.....	11
3.5 Evaluación del tiempo de curado.....	12
3.6 Análisis de muestras.	12
3.7 Evaluación de eficiencia agronómica.	12
Capítulo 4 Resultados y discusión.	13
4.1 Roca fosfórica.	13
4.2 Caracterización física y química de la roca fosfórica.	13
4.3 Ataque con ácido.....	14
4.4 Evaluación del tiempo de curado.....	8
4.5 Muestra elegida y comparación comercial.	9
4.6 Análisis de muestras.	30
4.7 Evaluación de eficiencia agronómica.	31
Capítulo 5 Conclusiones.	37
Bibliografía	38
Anexos	40

Lista de tablas

Tabla 1. Características físicas de la roca fosfórica.....	13
Tabla 2. Granulometría de los tipos de roca fosfórica usados	14
Tabla 3. Caracterización química de la roca fosfórica proveniente de la mina	14
Tabla 4. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, primera proporción con HNO ₃ ...	15
Tabla 5. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, segunda proporción con HNO ₃ ...	16
Tabla 6. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, primera proporción con HNO ₃	17
Tabla 7. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, segunda proporción con HNO ₃	18
Tabla 8. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, primera proporción con HNO ₃	19
Tabla 9. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción con HNO ₃	19
Tabla 10. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción, segunda granulometría con HNO ₃	21
Tabla 11. pH inicial y final, según tipo de roca.....	21
Tabla 12. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, primera proporción con H ₃ PO ₄ ..	22
Tabla 13. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, segunda proporción con H ₃ PO ₄ ..	23
Tabla 14. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, primera proporción con H ₃ PO ₄ ...	24
Tabla 15. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, segunda proporción con H ₃ PO ₄ ..	25
Tabla 16. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, primera proporción con H ₃ PO ₄	26
Tabla 17. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción con H ₃ PO ₄	26
Tabla 18. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción, segunda granulometría con H ₃ PO ₄	28
Tabla 19. Especificaciones productos comerciales.....	29
Tabla 20. Comparación muestra 1 Vs. NutriXPRES®	30
Tabla 21. Comparación muestra 2 Vs. Phosplant®	30
Tabla 22. Comparación muestra 3 Vs. PhosXPRES®	31
Tabla 23. Caracterización suelo	32

Lista de figuras

Figura 1. Etapas obtención nitrofosfato y superfosfato	9
Figura 2. Roca industrial	10
Figura 3. Fertifoscal	10
Figura 4. Fosfoabono	10
Figura 5. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, primera proporción con HNO ₃	16
Figura 6. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, segunda proporción con HNO ₃	16
Figura 7. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, primera proporción con HNO ₃	17
Figura 8. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, segunda proporción con HNO ₃	18
Figura 9. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, primera proporción con HNO ₃	19
Figura 10. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción con HNO ₃	20
Figura 11. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, primera proporción con H ₃ PO ₄	22
Figura 12. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, segunda proporción con H ₃ PO ₄	23
Figura 13. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, primera proporción con H ₃ PO ₄	24
Figura 14. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, segunda proporción con H ₃ PO ₄	25
Figura 15. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, primera proporción con H ₃ PO ₄	26
Figura 16. P ₂ O ₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción con H ₃ PO ₄	27
Figura 17. Nitrofosfato	29
Figura 18. Superfosfato.....	29
Figura 19. Macetas para el maíz.	33
Figura 20. Maceta con fertilizante.....	33
Figura 21. Borla del maíz.....	34
Figura 22. Mazorca.....	34
Figura 23. Hoja amarillenta.....	34
Figura 24. Hoja Violeta.....	34
Figura 25. Maíz germinado.....	35
Figura 26. Maíz en casa malla.....	35

Capítulo 1

Introducción

La empresa Fosfonorte S.A., ubicada en el sector de Sardinata, departamento de Norte de Santander, ha estado desarrollando un plan de crecimiento como parte del mejoramiento continuo en la atención de las necesidades de roca fosfórica como materia prima, en las grandes, medianas y pequeñas empresas del territorio colombiano.

En el nivel estratégico, la empresa ha encontrado la necesidad de desarrollar una línea de producción, que dé respuesta a una oportunidad de crecimiento detectada en la elaboración de nuevos productos para una línea de fertilizantes; para ello se estima el montaje de una nueva planta de acidulación.

El trabajo aquí presentado, se justifica en la necesidad de definir los recursos y procesos necesarios en torno a esta necesidad, y se aplica como parte de las decisiones estratégicas en el desarrollo de un nuevo sistema productivo. El abordaje de esta decisión desde una perspectiva técnica, resulta de gran utilidad para la academia y la empresa, pues se ha plasmado dentro de este trabajo una metodología de designación de recursos y procesos a una capacidad de producción definida, en la que se combina las características, requerimientos, líneas de producción, normatividad establecida y demás factores de la organización.

De acuerdo con esto, se planteó como objetivo general la obtención de un fertilizante fosfatado, con mayor solubilidad y eficiencia en comparación con el estado natural de la roca fosfórica, de donde para lograr este objetivo principal, se definieron como objetivos específicos la estandarización de un proceso con línea de producción, para el mayor aprovechamiento de la roca fosfórica; y de la misma manera determinar la mejor alternativa para su industrialización.

1.1 Planteamiento del problema

En todo el país, y específicamente en el departamento de Norte de Santander, se encuentran gran cantidad de hectáreas de suelos sin generar algún tipo de producción agrícola, esto se debe principalmente a los altos costos en todas las etapas del cultivo (Adecuación del terreno, siembra, riegos, fertilización y manutención, y cosecha), por lo que el desaprovechamiento agrícola y el desempleo en este sector ha sido un factor de problema a lo largo del tiempo (Instituto geográfico Agustín Codazzi , 2012).

Según estudios de fertilidad de suelos nacionales y regionales, se puede concluir claramente que los suelos de la región de estudio son altamente ácidos y con muchas deficiencias de los nutrientes principales que necesita la planta para llevar a cabo su ciclo de vida; lo que dificulta y encarece en gran medida el cultivo de diferentes productos tan necesarios e importantes para el consumo (Zapata Hernandez R. D., 2004).

En este momento, en todo el departamento de Norte de Santander, no existe una empresa consolidada que se dedique a la fabricación de fertilizantes e insumos agrícolas en general, por lo que los cultivadores se ven obligados a adquirir productos de otras partes del país, a un alto costo y a veces según necesidades específicas del suelo, a importarlos.

Esto lleva a establecer la necesidad de desarrollar un producto, con muchas ventajas desde varios puntos de vista. En cuanto al desarrollo agrícola de la región, en solución a ciertos problemas de deficiencia de nutrientes en el suelo, a un menor costo y con mucha más facilidad de adquisición. Por otra parte, grandes aportes al desarrollo industrial de la región; generación de empleo, ya que se le dará paso a una óptima utilización de los recursos naturales del departamento; incrementando así la innovación y el emprendimiento. Económicamente, la posibilidad de entrar a competir en el selecto grupo nacional de productores de fertilizantes, con menores precios; ya

que se cuenta con la materia prima propia de la región.

Adicional a esto, darle un uso más eficiente a la roca fosfórica, teniendo en cuenta que los yacimientos de FOSFONORTE S.A., son los únicos en todo el departamento y los que cuentan con mayor concentración de fósforo de todo el país.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.

Obtener un fertilizante fosfatado, con mayor solubilidad y eficiencia, en comparación con el estado natural de la roca fosfórica; para ser utilizado en la producción agrícola nacional.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Obtener un fertilizante enriquecido con nitrógeno, mediante acidulación parcial con ácidos fuertes, para solucionar la deficiencia de Nitrógeno, Fósforo y Calcio en los suelos regionales y nacionales.
- Estandarizar el proceso de producción, en función de la materia prima y la solubilidad del fósforo.
- Determinar la mejor alternativa para la industrialización de la roca fosfórica de Norte de Santander.

Capítulo 2

Marco Teórico

El fósforo (P) es uno de los elementos vitales para la agricultura ya que compone todas las cadenas alimenticias, pasando de un organismo a otro (Bhattacharya, 2019).

El fósforo interviene en casi todas las reacciones químicas, ya sea en compuestos minerales como en combinaciones orgánicas. La falta de fósforo reduce la producción de granos y semillas y su deficiencia disminuye el valor alimenticio de estos. Las plantas lo absorben de la solución del suelo, o fase acuosa del suelo, así como la mayoría de los demás elementos. Normalmente un suelo puede poseer fósforo para sostener la vida vegetal, pero muchas veces éste es insuficiente para suplir la demanda de los cultivos, cada vez con mayor potencial de rendimiento. Por esa razón, el fósforo debe agregarse como fertilizante ya que no hay otra fuente disponible en la naturaleza (Castro y Melgar, 2005).

La industria transforma las rocas fosfóricas que contienen el fósforo poco soluble, en formas iónicas aprovechables por las plantas que lo absorben del suelo. Por esta importancia, los componentes minerales o materias primas son estratégicos para la industria de fertilizantes. El primer fertilizante industrial de la historia, el superfosfato simple se hizo en Inglaterra en 1842. Hacia la mitad del siglo diecinueve el fósforo era el principal nutriente que limitaba la producción agrícola. El origen de la industria de fertilizantes fosfatados proviene de los residuos de la industria frigorífica, cuando John Bennet Lawes de Rothamstead procesó con ácido sulfúrico los restos de las carcasas para transformar el fosfato tricálcico de los huesos. Patentó así la manufactura del superfosfato simple en 1842 e instaló la primera fábrica de producción comercial en Londres al año siguiente. En E.U.A. El fosfato de amonio fue producido por primera vez en 1916; pero fue el

proceso económico y eficiente para fabricar ácido fosfórico introducido por Dorr Oliver y el equipo técnico del Tennessee Valley Authority (TVA) al final de 1950 que llevó a convertir el uso en Norteamérica del superfosfato simple a superfosfato triple y luego a los fosfatos de amonio (Williams, 1993).

Las rocas fosfóricas pueden ser utilizadas como materia prima para la fabricación industrial de los fertilizantes fosfatados solubles en agua o bien como fuentes de fósforo para la aplicación directa en la agricultura.

Los fertilizantes compuestos N-P-K de alta concentración constituyen actualmente la base principal de la industria mundial de los fertilizantes, para los que se usa como materia prima esta roca fosfórica y ácido nítrico, o amoníaco (Instituto colombiano agropecuario, 2011).

Si el porcentaje de P_2O_5 de la roca fosfórica es mayor que el 20%, recibe el nombre de fosforita. El apatito de la fosforita constituye la materia prima para la producción de fósforo elemental, ácido fosfórico y otras sales fosfóricas que se utilizan en las industrias químicas, además de termofosfatos, ácido fosfórico, rocas fosfóricas parcialmente aciduladas y nitrofosfatos.

La elaboración de superfosfato triple requiere de un proceso de acidulación de la roca fosfórica con ácido fosfórico. (A.Hakam, Khoulood, & Y.Zeroual, 2012), afirman que la producción de superfosfato triple se basa en utilizar una primera etapa de reacción donde se emplea el 15-40 % de la totalidad de la roca fosfórica a consumir en el proceso, reaccionando con el ciento por ciento del ácido fosfórico requerido estequiométricamente en el proceso de producción. Se puede elaborar un superfosfato más sencillo, con una menor proporción; ya que este proceso retiene el sulfato de calcio, y es por ello que resulta demandado en aquellos casos donde la deficiencia de calcio limita el rendimiento agrícola del cultivo (Cantera, 2018).

En la elaboración de nitrofosfatos, se hace reaccionar la roca con ácido nítrico. Según (Hussain, 2012), el uso del ácido nítrico, en vez del ácido sulfúrico para producir fertilizantes a partir de la roca, recibió estímulo en Europa poco después de finalizada la segunda guerra mundial, cuando parecía inminente una prolongada escasez de azufre. La escasez fue de duración limitada, pero las ventajas de producir fertilizantes compuestos sin la ayuda del ácido fosfórico o sulfúrico, ha atraído desde entonces a los productores de varias partes del mundo.

En adición a los procesos mencionados en la elaboración fosfatos, también existe un proceso denominado acidulación parcial de la fosforita, que consiste en mezclar la roca molida con un ácido fuerte; pero en este caso la cantidad de ácido adicionado es inferior a la estequiometría, dando como resultado una fosforita o roca parcialmente acidulada, es decir, solo se ha solubilizado una parte del fósforo total contenido en el mineral (Farah, Salah, & Mustafa, 2014).

Las rocas parcialmente aciduladas son menos costosas que los fertilizantes fosfatados completamente acidulados debido a que necesitan menores cantidades de ácido y energía por unidad de fósforo (P_2O_5) en el producto. También son a menudo más concentradas que el superfosfato simple y en algunas situaciones, puede ser un medio preferido para mejorar la eficiencia agronómica de la roca fosfórica. El objetivo es solubilizar la máxima cantidad de roca, para un nivel dado de ácido utilizado.

Incrementando el nivel de acidulación, se incrementa el contenido de fósforo soluble en agua y la efectividad agronómica de las rocas parcialmente aciduladas; en todos los casos este comportamiento agronómico debe ser evaluado, para determinar el nivel rentable de acidulación (Owusu-Bennoah, Casanova, Rodríguez y Herrera, 2002).

El tiempo de curado, es un tiempo aproximado de dos semanas necesario para que se completen las reacciones químicas y se disminuya la acidez libre de los productos; la ausencia de este tiempo genera riesgo de apelmazamiento y compactación del producto, por lo que se hace necesario tomar medidas como tamizado apropiado, almacenamiento correcto y determinación de tiempo óptimo. (Guerrero Riascos, 2016)

Los resultados alcanzados mediante diferentes investigaciones sobre la efectividad agronómica de las rocas parcialmente aciduladas como lo indican (Santos, y otros, 2016), (Rahman, Muhammad, Mussarat, & Sharif, 2018), (Anjorin, Oladipupo, Ayodele, & Agbaje, 2018), (Dodor, 2016), (Sampaio, y otros, 2018), (Chien, 2003) permiten concluir que las rocas parcialmente aciduladas de 40-50% de acidulación con el ácido sulfúrico, o 20-30% de acidulación con el ácido fosfórico, son tan eficientes como el superfosfato de completa acidulación.

El manejo eficiente de la nutrición en el cultivo de maíz es uno de los pilares fundamentales para alcanzar rendimientos elevados sostenidos en el tiempo y con resultados económicos positivos, no sólo en el mismo cultivo de maíz, sino en los que participan en su rotación, ya que por los elevados volúmenes de rastrojos dejados por el maíz, facilitan el reciclado de nutrientes y mejoran las condiciones físicas del suelo, mejorando así su eficiencia. Los nutrientes que limitan en mayor medida la productividad del cultivo del maíz son el nitrógeno, y el fósforo. (Camaño, Melgar, 2015)

Al abordar la fertilización fosfatada en maíz desde el punto de vista del manejo nutricional, el principal aspecto a considerar es su baja movilidad en el suelo, lo hace principalmente por difusión, y la presencia de retención específica de los fosfatos en las arcillas, cuya magnitud

depende de la cantidad y mineralogía de esta fracción. (Echeverría, García, 2015).

En suelos de alto pH (6.5-8.0), (Chien, 2003) las rocas parcialmente aciduladas pueden ser tan eficientes como el superfosfato, aunque con un grado más alto de acidulación con, de hasta el 50% (cerca del 66% del P total en forma asimilable). Las posibles explicaciones para la alta eficiencia agronómica de las rocas parcialmente aciduladas son: El efecto de iniciación temprana del desarrollo radicular debido al fosfato monocálcico de las rocas parcialmente aciduladas y la subsiguiente mayor exploración del suelo enriquecido con P por las raíces; o la disolución del fosfato monocálcico en la solución del suelo, para formar ácido fosfórico que reacciona con la roca fosfórica residual (acidulación secundaria).

Como resultado de una investigación, se llega a la conclusión que, en los suelos colombianos, existe una deficiencia general en fósforo y en calcio, mientras que el nitrógeno, aunque no abunda en muchas regiones, está menos escaso.

La acción del clima se manifiesta en la repartición y la frecuencia de la aforis por su efecto sobre las plantas. La cantidad de lluvias y su repartición influyen sobre el crecimiento de los pastos y su facultad de absorción. Su contenido en fósforo varía según que la lluvia caiga abundantemente en un corto periodo o al contrario por pequeñas cantidades, en un largo periodo. (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2016).

Estudios recientes han mostrado la posibilidad del mejoramiento de la nutrición vegetal y animal, mediante la rehabilitación de los suelos. El único medio de reparar esta situación es con la aplicación de superfosfatos o de abonos completos, con alto contenido en fósforo, y es preciso que los agricultores de Colombia se apersonen del asunto. (Ministerio de agricultura y desarrollo rural, 2019).

Capítulo 3

Metodología

La figura 1. Muestra las etapas de obtención de nitrofosfatos y superfosfatos.

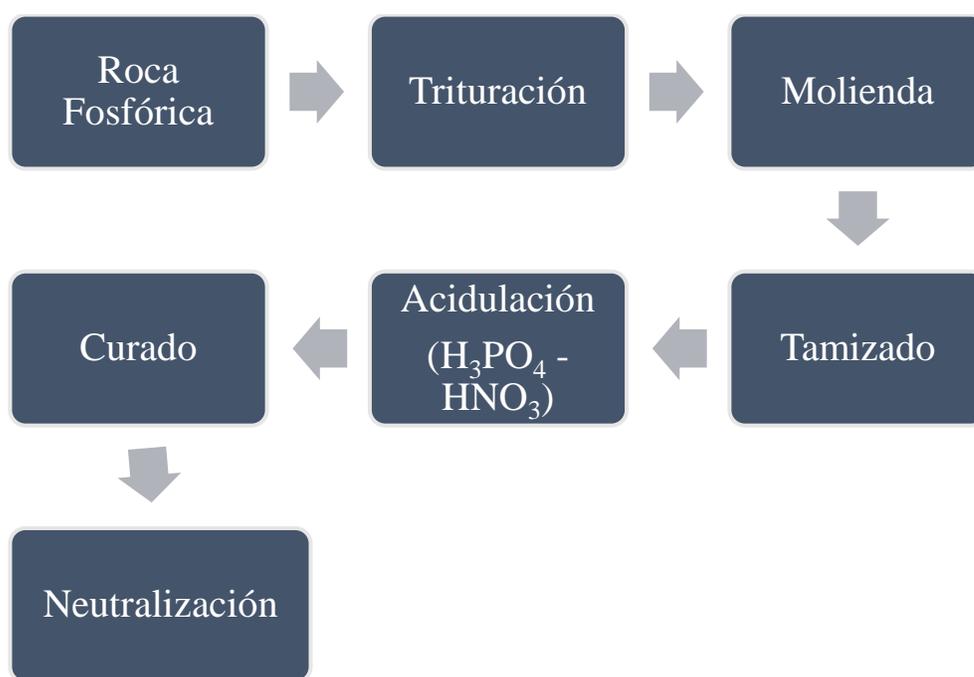


Figura 1. Etapas obtención nitrofosfato y superfosfato.

3.1 Roca fosfórica

La roca fosfórica proveniente de la mina Fosfonorte (Sardinata, Norte de Santander), fue caracterizada y seguidamente se realizó el tratamiento con el fin de obtener los fertilizantes, y una evaluación que proporcionó una medida de su eficiencia en el suelo.



Figura 2. Roca industrial.

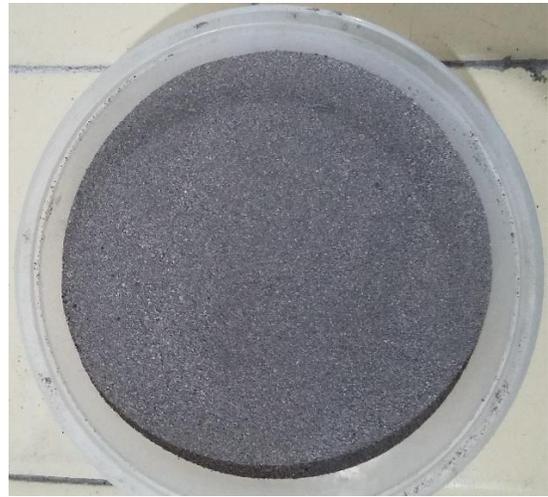


Figura 3. Fertifoscal.



Figura 4. Fosfoabono.

3.2 Revisión de la bibliografía.

En la primera etapa de la ejecución del proyecto, se realizó una amplia revisión bibliográfica, usando las bases de datos proporcionadas por la universidad como Science Direct, esto con el objetivo de recopilar la mayor parte de información sobre el tema, y tener base sobre

obras de distintos autores con sus respectivos resultados, que soporten las investigaciones allí plasmadas. De esta manera se obtuvo un punto claro de partida.

3.3 Caracterización física y química de la roca fosfórica.

Después de la recepción de la roca fosfórica proveniente de la mina, se realizó una caracterización de esta. Se determinó el color, la forma, el pH (NTC 5527, potenciómetro), solubilidad (NTC 234, Colorimetría) y granulometría.

La roca fosfórica fue sometida a una serie de análisis cuantitativos con el fin de determinar los porcentajes de calcio (CaO , NTC 1369, mineralización vía húmeda, $\text{HNO}_3\text{:HCl}$, espectroscopía de absorción atómica), sílice (SiO_2 , NTC 1369, mineralización vía húmeda, $\text{HNO}_3\text{:HCl}$, espectroscopía de absorción atómica), fósforo total (P_2O_5 , NTC 234, mineralización vía húmeda, $\text{HNO}_3\text{:HCl}$, colorimetría) y fósforo asimilable (P_2O_5 , NTC 234, solución de citrato de amonio, colorimetría).

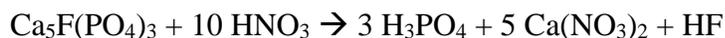
3.4 Ataque con ácido.

Para elaborar el fertilizante, se usó la roca fosfórica proveniente de los yacimientos de Fosfonorte S.A. que son: Fosfoabono que contiene 30% de calcio en forma de (CaO), y 25% de fósforo en forma de (P_2O_5); Fertifoscal (43% CaO y 30% P_2O_5); y Roca industrial (49% CaO y 35% P_2O_5). Se usaron ácidos fuertes como ácido fosfórico a una concentración de 85% (p/p); ácido nítrico a una concentración de 70% (p/p), y amoníaco como fuente de nitrógeno y neutralizador de pH. Se uso como reactor un vaso de vidrio agitado y tiempo de agitación de media hora.

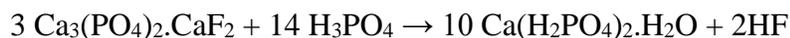
Para esto se tienen como base las reacciones respectivas; pero se parte del concepto de acidulación parcial, que infiere una menor cantidad de ácido que la dada por la estequiometría; esto con el objetivo de encontrar una proporción óptima de mezcla entre la roca y el ácido, para

subir los niveles de fósforo total, fósforo asimilable, nitrógeno y pH; hasta el punto requerido para lograr la comparación con productos comerciales existentes.

Reacción Roca fosfórica – Ácido nítrico:



Reacción Roca fosfórica – Ácido fosfórico:



3.5 Evaluación de tiempo de curado.

Después de optimizar las proporciones de mezcla, se dio paso a la evaluación del tiempo de curado; que es el tiempo que necesita la reacción para llevarse a cabo completamente. Para esto cada 5 días se realizaron análisis de las muestras para ver en qué tiempo se solubiliza la mayor cantidad de P_2O_5 .

3.6 Análisis de muestras.

Las muestras de producto resultantes fueron enviadas a un laboratorio indicado por el ICA, para el análisis de parámetros como fósforo total, fósforo asimilable, Nitrógeno total, Calcio total, y pH. Esto con el final de realizar una comparación real con productos existentes.

3.7 Evaluación de eficiencia agronómica.

Por último, ya con el producto especificado, se llevó a cabo una evaluación agronómica, que consistió en tomar una serie de suelos ácidos provenientes del departamento, y una planta indicadora como el maíz; se hará la preparación de la tierra, la siembra, la fertilización, y diariamente se darán los cuidados necesarios como el riego. Esto con el fin de evaluar la eficiencia del producto, teniendo en cuenta que el período vegetativo de la planta de maíz es de 3 meses.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1 Roca fosfórica

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de la roca fosfórica proveniente de la mina Fosfonorte, ubicada en el municipio de Sardinata, Departamento del Norte de Santander.

4.2 Caracterización física y química de la roca fosfórica.

En la tabla 1. Se muestran las características físicas de la roca fosfórica con la cual se trabajó.

Tabla 1. Características físicas de la roca fosfórica

Color	Forma	pH	Solubilidad %
Gris	Granulada	7.5	2 (Insoluble)

La insolubilidad de la roca la hace poco apta para ser aplicada directamente sin previo tratamiento a los cultivos.

Tabla 2. Granulometría de los tipos de roca fosfórica usados.

Tipo de roca	# Malla	Abertura (mm)	% Que pasa
Fosfoabono	100	0,149	80
Fertifoscal	100	0,149	80
Roca Industrial	45	0,354	85

En la tabla 2. Se observa que los tipos de roca extraídos de la mina, y sometidos a molienda y tamizado, pasan en su mayor cantidad por la malla 100, para el caso de fosfoabono y fertifoscal, y para la malla 45, para la roca industrial; dando así una granulometría de 0,149 mm y 0,354 mm, respectivamente. Este es un tamaño adecuado para las mezclas con ácido.

Tabla 3. Caracterización química de la roca fosfórica proveniente de la mina.

Tipo de roca	% P₂O₅ Total	% P₂O₅ asimilable	% Calcio	% Sílice
Fosfoabono	25	0-1	30	2,21
Fertifoscal	30	0-1	43	2,21
Roca Industrial	35	0-1	49	2,21

En la tabla 3. Se evidencia la caracterización química de la roca recibida de la mina fosfonorte.

4.3 Ataque con ácido

La roca fue acidulada con ácido nítrico con una concentración de 70% (p/p), y ácido fosfórico con una concentración de 85% (p/p). Las proporciones fueron, 700 g de cada tipo de roca, por cada 300 ml de ácido para la primera prueba, y de 900 g de roca por cada 100 ml de ácido para la segunda. Estas se estimaron teniendo en cuenta bibliografía y propiedades de productos comerciales existentes.

Las observaciones de la mezcla y reacción fueron las siguientes:

- Para roca – HNO₃, se evidenció una mezcla muy aglutinada, lo que dificultó en gran medida el mezclado, se necesitó más de los 20 minutos previstos para que los reactivos se pusieran en contacto totalmente. Para fosfoabono y fertifoscal, se evidenció una mezcla más homogénea en más corto tiempo; mientras que, para roca industrial, fue más dificultoso, de poner en contacto ambas fases.

- Para roca – H_3PO_4 , se evidenció una mezcla mucho más suelta al contacto, la roca se impregno correctamente y en menor tiempo, el mezclado fue sencillo y en condiciones normales. Nuevamente la mezcla se comportó de mejor manera para fosfoabono y fertifoscal, mientras que para roca industrial fue más dificultoso de poner en contacto.
- En la mezcla roca – H_3PO_4 , los productos tendieron a secarse en más corto tiempo, mientras que para roca – HNO_3 , se mantuvieron más húmedos.
- En ambos casos, la reacción fue exotérmica y se evidenció la emanación de vapores, durante los primeros 5 minutos de agitación.
- En ambos casos, cada 5 días se realizó la prueba de P_2O_5 asimilable (Anexo A) y los resultados se evidencian a continuación.

Roca – HNO_3

Fosfoabono

Primera proporción

Tabla 4. P_2O_5 asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, primera proporción con HNO_3 .

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P_2O_5 Total	25	25	25	25	25
% P_2O_5 Asimilable	11	13	13,5	13,5	14

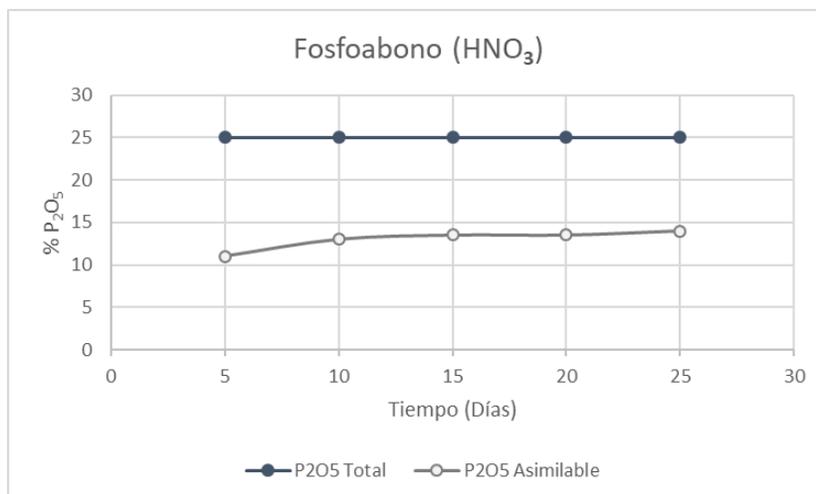


Figura 5. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, primera proporción con HNO₃.

Segunda proporción

Tabla 5. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, segunda proporción con HNO₃.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P₂O₅ Total	25	25	25	25	25
% P₂O₅ Asimilable	15	17	17,5	17,5	18

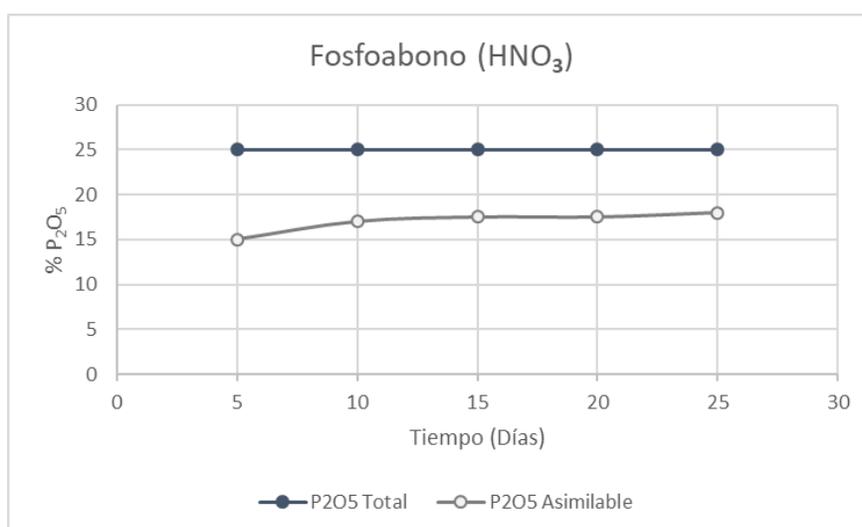


Figura 6. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, segunda proporción con HNO₃.

Según tablas 4-5 y figuras 5-6. Se evidenció que la mayor cantidad de pentóxido de fósforo se solubilizó dentro de los primeros 5 días, y siguió en aumento por 10 días más; después del día 20 se mantuvo casi constante hasta completar el mes, donde su aumento no fue significativo. Para la primera proporción se solubilizó un porcentaje de 56%, y para la segunda, fue mayor al 70% lo que se traduce en una buena elección de proporción de mezcla.

Fertifoscal

Primera proporción

Tabla 6. P_2O_5 asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, primera proporción con HNO_3 .

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P_2O_5 Total	30	30	30	30	30
% P_2O_5 Asimilable	17	18	18	19,5	20

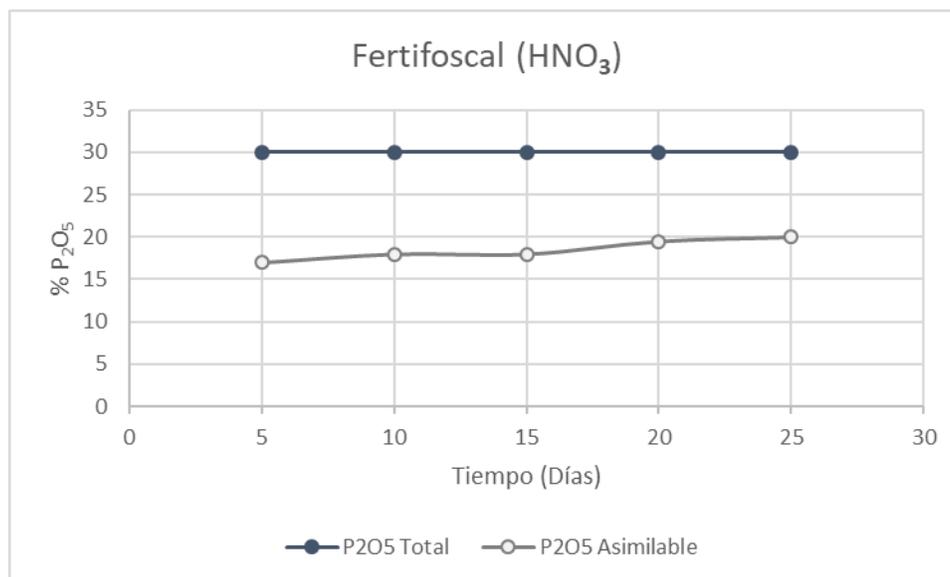
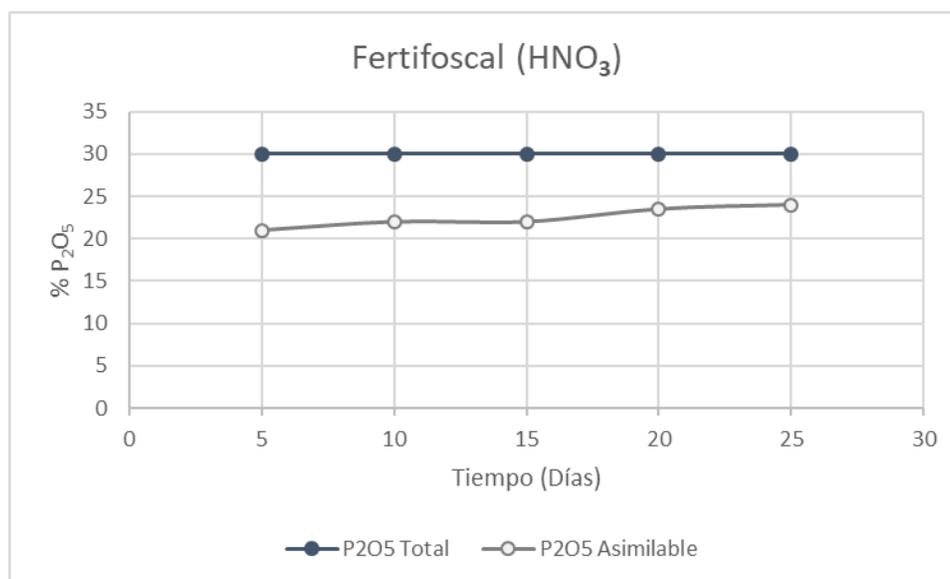


Figura 7. P_2O_5 asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, primera proporción con HNO_3 .

Segunda proporción

Tabla 7. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, segunda proporción con HNO₃.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Total	30	30	30	30	30
% P ₂ O ₅ Asimilable	21	22	22	23,5	24

Figura 8. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, segunda proporción con HNO₃.

Según tablas 6-7 y figuras 7-8. Se evidenció que la mayor cantidad de pentóxido de fósforo se solubilizó dentro de los primeros 5 días, y siguió en aumento por 10 días más; después del día 20 se mantuvo casi constante hasta completar el mes, donde su aumento no fue significativo. Para la primera parte, se solubilizó un porcentaje del 66%, 12% más que el fosfoabono, y para la segunda, un porcentaje del 80%, 10% más que el fosfoabono, lo que puede deberse a que la cantidad de fósforo total en su composición es mayor.

Roca industrial

Primera proporción

Tabla 8. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, primera proporción con HNO₃.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Total	35	35	35	35	35
% P ₂ O ₅ Asimilable	18	19	20,5	20,5	21

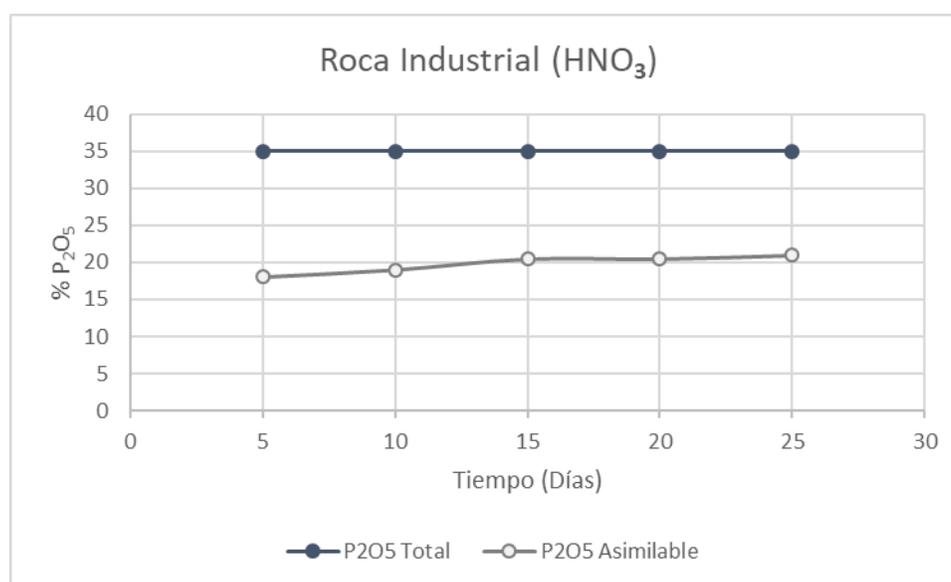


Figura 9. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, primera proporción con HNO₃.

Segunda proporción

Tabla 9. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción con HNO₃.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Total	35	35	35	35	35
% P ₂ O ₅ Asimilable	22	23	24,5	24,5	25

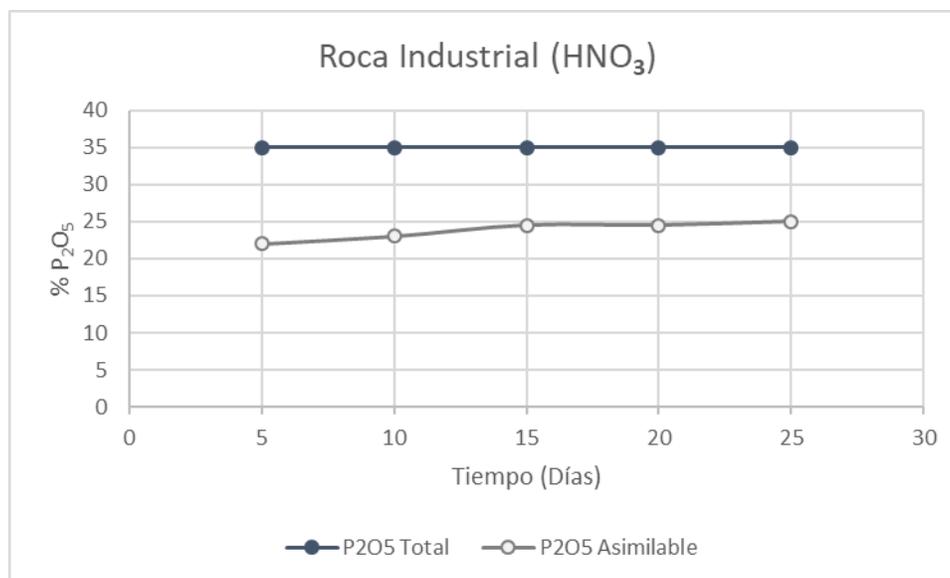


Figura 10. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción con HNO₃.

Según tablas 8-9 y figuras 9-10. Se evidenció que la mayor cantidad de pentóxido de fósforo se solubilizó dentro de los primeros 5 días, y siguió en aumento por 10 días más; después del día 20 se mantuvo casi constante hasta completar el mes, donde su aumento no fue significativo. En la primera proporción se solubilizó un porcentaje del 60%, 6% menos que el fertifoscal, y 4% más que el fosfoabono; y para la segunda 71%, 1% más que el fosfoabono.

De este análisis se puede argumentar, que a pesar de que la roca industrial es la que más contenido de fósforo tiene, no presenta un buen comportamiento en la mezcla, y no solubiliza el pentóxido necesario; por lo que se desaprovechan sus propiedades respecto a los otros dos tipos. A raíz de esta situación, se toma la decisión de moler hasta una malla con abertura más fina, para lograr mejores resultados con la segunda proporción de mezcla; lo que se evidencian a continuación:

Malla #325, abertura: 0,044 mm.

Tabla 10. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción, segunda granulometría con HNO₃.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P₂O₅ Total	35	35	35	35	35
% P₂O₅ Asimilable	29	30	30	30	30

En esta prueba con roca industrial, se evidenció una mezcla completamente homogénea, mejores condiciones de mezclado, perfecta impregnación de la roca, y producto suelto al contacto.

Según tabla 10, se puede evidenciar que el pentóxido de fósforo solubilizó casi completamente durante los primeros 5 días, hasta un porcentaje de más del 85%. Lo que deja concluir, que entre más fina sea la partícula, mejor se comporta durante la mezcla, y da mejores resultados de reacción, y de esta manera se aprovecha al máximo la composición de este tipo de roca.

- Para todas las muestras de roca y ácido nítrico, al final del tiempo de curado, se le adicionó una cantidad de amoníaco comercial, para lograr la total activación del nitrógeno en la mezcla y ayudar a ajustar el pH.

Tabla 11. pH inicial y final, según tipo de roca.

Tipo de Roca	pH inicial	NH₃ (ml)	pH final
Fosfoabono	1,81	2	2
Fertifoscal	1,92	2	2
Roca industrial	2	2	2,5

Roca – H₃PO₄

Fosfoabono

Primera proporción

Tabla 12. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, primera proporción con H₃PO₄.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Total	25	25	25	25	25
% P ₂ O ₅ Asimilable	16	18	19	19,5	19,5

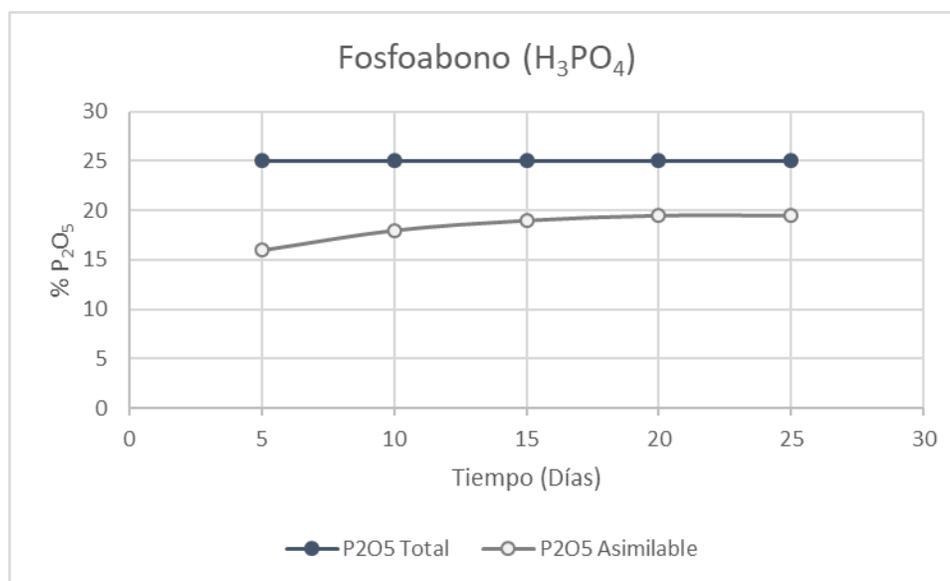
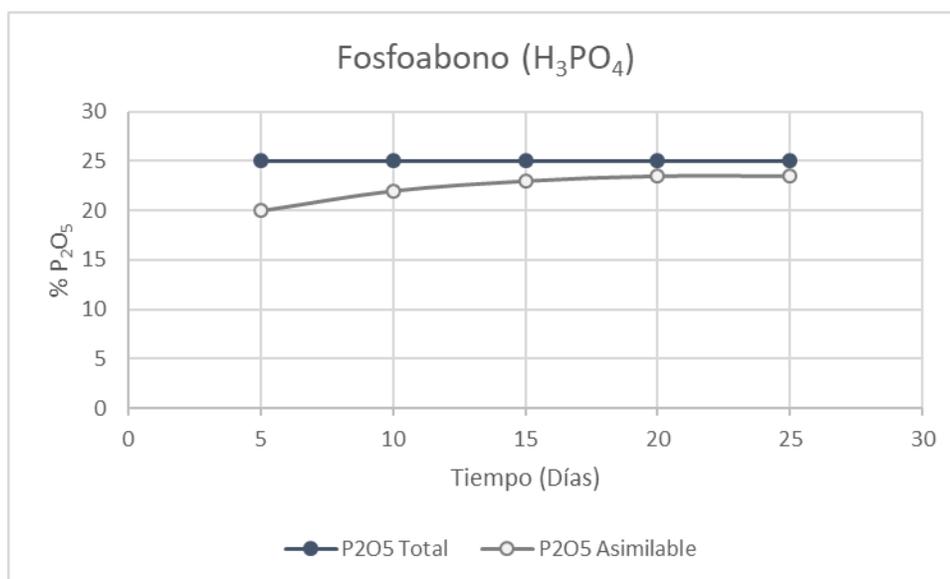


Figura 11. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, primera proporción con H₃PO₄.

Segunda proporción

Tabla 13. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, segunda proporción con H₃PO₄.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Total	25	25	25	25	25
% P ₂ O ₅ Asimilable	20	22	23	23,5	23,5

Figura 12. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fosfoabono, segunda proporción con H₃PO₄.

Según tablas 12-13 y figura 11-12. Se evidenció que la mayor cantidad de pentóxido de fósforo se solubilizó dentro de los primeros 5 días, y siguió en aumento por 10 días más; después del día 20 se mantuvo casi constante hasta completar el mes, donde su aumento no fue significativo. Para la primera proporción se solubilizó un porcentaje del 78%, y en la segunda, 94% lo que se traduce en una excelente elección de proporción de mezcla; superando significativamente la acidulación con ácido nítrico.

Fertifoscal

Primera proporción

Tabla 14. P_2O_5 asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, primera proporción con H_3PO_4 .

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P_2O_5 Total	30	30	30	30	30
% P_2O_5 Asimilable	20	22,5	24	25	25

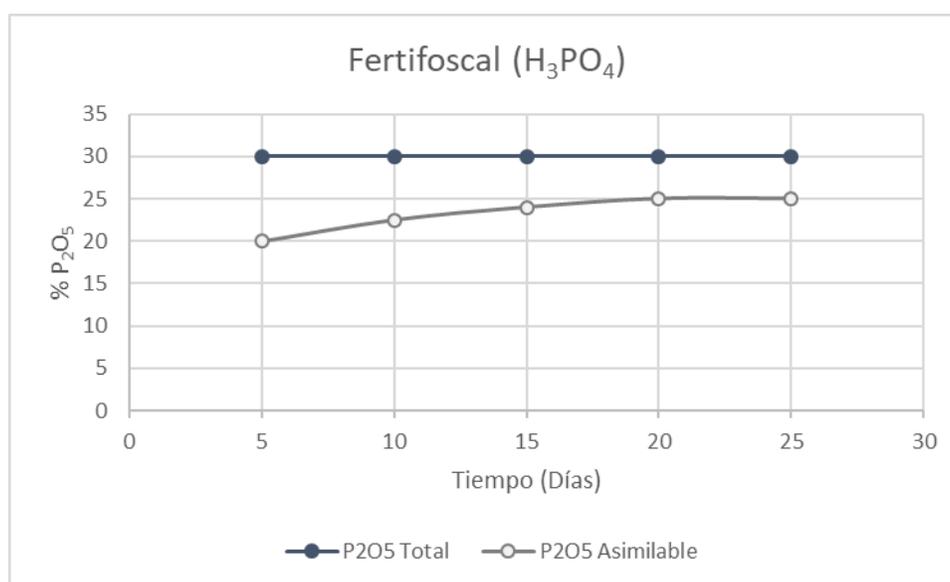
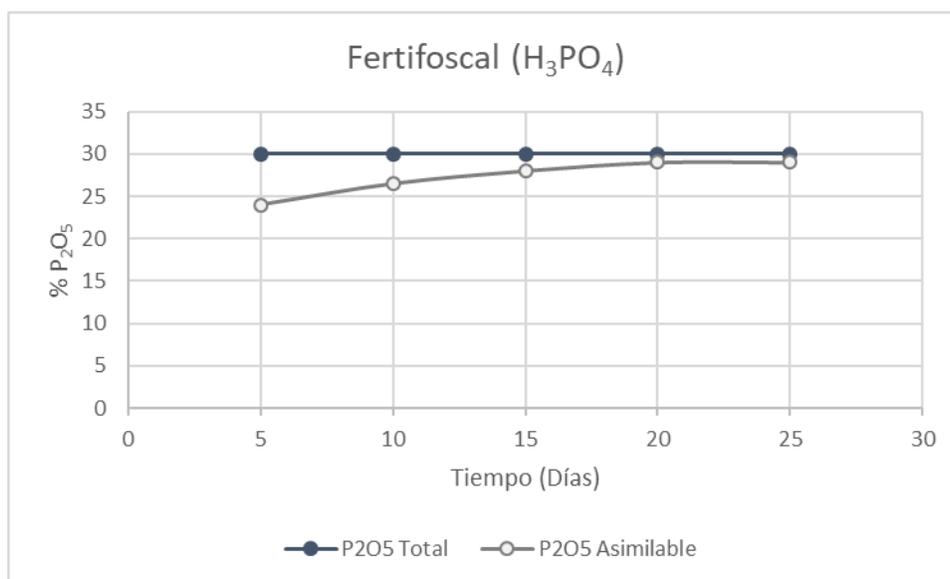


Figura 13. P_2O_5 asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, primera proporción con H_3PO_4 .

Segunda proporción

Tabla 15. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, segunda proporción con H₃PO₄.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Total	30	30	30	30	30
% P ₂ O ₅ Asimilable	24	26,5	28	29	29

Figura 14. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Fertifoscal, segunda proporción con H₃PO₄.

Según tablas 14-15 y figuras 13-14. Se evidenció que la mayor cantidad de pentóxido de fósforo se solubilizó dentro de los primeros 5 días, y siguió en aumento por 10 días más; después del día 20 se mantuvo casi constante hasta completar el mes, donde su aumento no fue significativo. Para la primera proporción, se solubilizó un porcentaje mayor al 83%, 5% más que el fosfoabono. En la segunda, se solubilizó un porcentaje de 96%, 2% más que el fosfoabono, lo que puede deberse a que la cantidad de fósforo total en su composición es mayor; dando un excelente resultado.

Roca industrial

Primera proporción

Tabla 16. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, primera proporción con H₃PO₄.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Total	35	35	35	35	35
% P ₂ O ₅ Asimilable	24	24,5	24,5	25	25

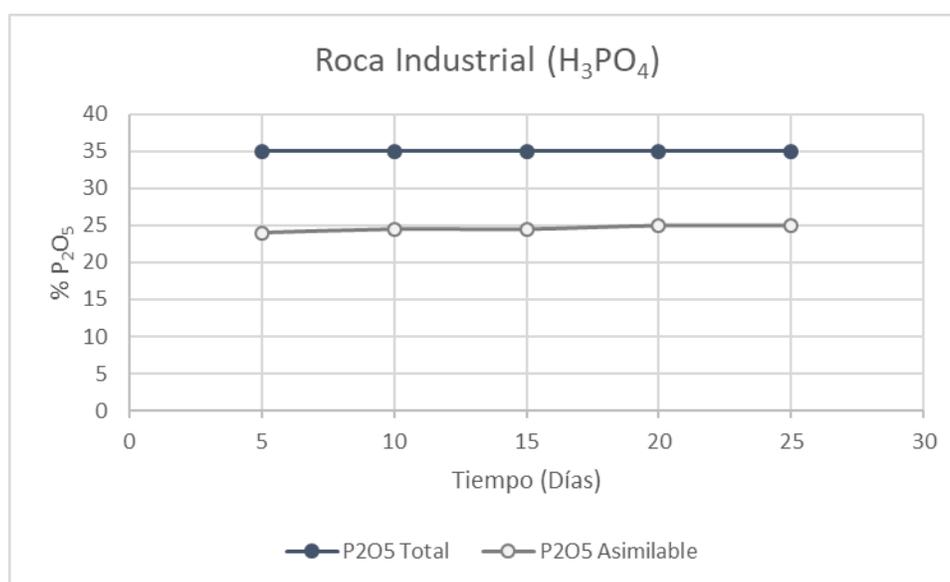


Figura 15. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, primera proporción con H₃PO₄.

Segunda proporción

Tabla 17. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción con H₃PO₄.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Total	35	35	35	35	35
% P ₂ O ₅ Asimilable	28	28,5	28,5	29	29

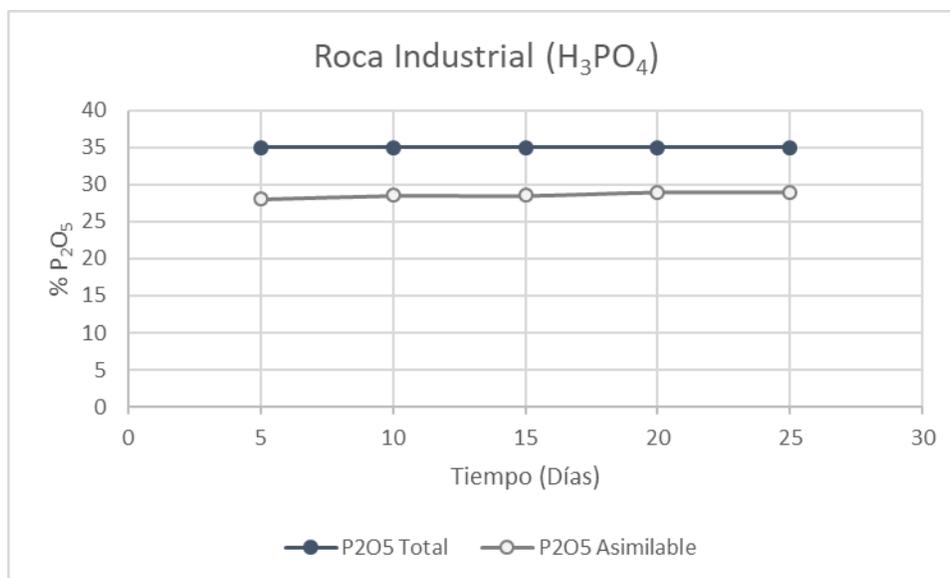


Figura 16. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción con H₃PO₄.

Según tablas 16-17 y figura 15-16. Se evidenció que la mayor cantidad de pentóxido de fósforo se solubilizó dentro de los primeros 5 días, y siguió en aumento por 10 días más; después del día 20 se mantuvo casi constante hasta completar el mes, donde su aumento no fue significativo. Para la primera proporción, se solubilizó un porcentaje del 71%, 12% menos que el fertifoscal, y 7% menos que el fosfoabono. En la segunda, se solubilizó un porcentaje de 82%, 14% menos que el fertifoscal, y 12% menos que el fosfoabono.

De este análisis se puede argumentar, que a pesar de que la roca industrial es la que más contenido de fósforo tiene, no presenta un buen comportamiento en la mezcla, y no solubiliza el pentóxido necesario; por lo que se desaprovechan sus propiedades respecto a los otros dos tipos. A raíz de esta situación, se toma la decisión de moler hasta una malla con abertura más fina, para lograr mejores resultados con la segunda proporción de mezcla; lo que se evidencian a continuación:

Malla #325, abertura: 0,044 mm.

Tabla 18. P₂O₅ asimilable en función del tiempo. Roca industrial, segunda proporción, segunda granulometría con H₃PO₄.

Tiempo (Días)	5	10	15	20	25
% P ₂ O ₅ Asimilable	35	35	35	35	35
% P ₂ O ₅ Total	33	34	34	34	34

En esta prueba con roca industrial, se evidenció una mezcla completamente homogénea, mejores condiciones de mezclado, perfecta impregnación de la roca, y producto suelto al contacto.

Según tabla 18, se puede evidenciar que el pentóxido de fósforo solubilizó casi completamente durante los primeros 5 días, hasta un porcentaje de más del 98%. Lo que deja concluir, que entre más fina sea la partícula, mejor se comporta durante la mezcla, y da mejores resultados de reacción, y de esta manera se aprovecha al máximo la composición de este tipo de roca.

4.4 Evaluación del tiempo de curado

En los ensayos de fosfoabono y fertifoscal, se puede evidenciar que el tiempo óptimo de curado es de 15 días aproximadamente, pues es el tiempo en que se solubiliza la mayor cantidad de fósforo.

Para la roca industrial, se puede concluir que el tiempo de curado depende de la granulometría de la partícula, pues entre más fina sea esta, mejor se comporta en la reacción y se lleva a cabo completamente casi de inmediato. Entre los primeros 5 días se solubilizó casi por completo anulando así el tiempo de curado, lo que implica muchas ventajas para el proceso, ya que se evita el almacenamiento del producto y se agiliza en gran magnitud.

4.5 Muestra elegida y comparación comercial.

En la tabla 19. Se especifica la composición de los tres productos comerciales elegidos como base comparable:

Tabla 19. Especificaciones productos comerciales.

Producto	Nitrógeno (%)	Sílice (%)	Fósforo total (%)	Fósforo asimilable (%)	Calcio (%)
Nutrixpres®	10	-	28	18	15
Phosplant®	-	3	21,4	21	20
Phosxpres®	-	3	35	35	25

Las muestras elegidas de cada una de las acidulaciones son:

Muestra 1. Roca – HNO₃, fertifoscal con primera proporción.

Muestra 2. Roca – H₃PO₄, fosfoabono con primera proporción.

Muestra 3. Roca – H₃PO₄, roca industrial con segunda proporción y segunda granulometría.



Figura 17. Nitrofosfato.



Figura 18. Superfosfato.

4.6 Análisis de muestras

Las tres muestras escogidas fueron enviadas a AGRILAB, laboratorio avalado por el ICA para realizar los respectivos análisis y la posterior comparación comercial.

Tabla 20. Comparación Muestra 1 Vs. Nutrixpres®

Parámetro	Muestra 1	Nutrixpres®
Nitrógeno (%)	8	10
Fósforo total (%)	30	28
Fósforo asimilable (%)	19	18
Calcio (%)	13	15
pH	2	1,88

En la tabla 20. Se muestran los resultados obtenidos para la muestra 1 y su comparación con Nutrixpres®. La muestra escogida, dio excelentes resultados en comparación con uno de los productos nitrogenados comerciales más vendidos en el departamento, sin necesidad de desaprovechar la roca con más contenido de fósforo y con una cantidad de ácido menor.

Tabla 21. Comparación Muestra 2 Vs. Phosplant®

Parámetro	Muestra 2	Phosplant®
Sílice (%)	2,21	3
Fósforo total (%)	25	21,4
Fósforo asimilable (%)	19	21
Calcio (%)	19	20
pH	4	3,25

En la tabla 21. Se muestran los resultados obtenidos para la muestra 2 y su comparación con Phosplant®. La muestra escogida, dio excelentes resultados en comparación con uno de los productos catalogados como superfosfato enriquecido, más usado en los suelos del departamento. Para ello se utilizó la roca con composición intermedia, y la menor cantidad de ácido. El pH se ajustó correctamente gracias a la cantidad de carbonatos de calcio que contiene la roca.

Tabla 22. Comparación Muestra 3 Vs. Phosxpres®

Parámetro	Muestra 3	Phosxpres®
Sílice (%)	2,21	3
Fósforo total (%)	35	35
Fósforo asimilable (%)	34	35
Calcio (%)	23	25

En la tabla 22. Se muestran los resultados obtenidos para la muestra 3 y su comparación con Phosxpres®. La muestra escogida, dio excelentes resultados en comparación con uno de los productos catalogados como superfosfato triple, más usado en los suelos del departamento. Para ello se utilizó la roca con mayor contenido de fósforo, y con la menor granulometría; además de la mayor cantidad de ácido. Esto se hizo necesario ya que fue la única opción de llegar al punto máximo de solubilización. Comercialmente este producto es de los más costosos.

El pH se ajustó correctamente gracias a la cantidad de carbonatos de calcio que contiene la roca.

4.7 Evaluación de eficiencia agronómica.

Para realizar la prueba de evaluación agronómica, se estudiaron las necesidades del maíz como planta indicadora, y se determinó que los nutrientes necesarios principales, son el fósforo,

calcio y nitrógeno; (Arévalo de Gauggel, 2010) por lo que se escogió la muestra 2 para realizar este estudio (Fertifoscal-HNO₃).

Se dispuso de un suelo proveniente del municipio de Tibú, Norte de Santander, para realizar este estudio. En la tabla 23. Se encuentran las especificaciones del suelo:

Tabla 23. Caracterización suelo.

Materia orgánica (%)	pH	Nitrógeno (%)	Fósforo (%)	Potasio (mg/Kg)	Calcio (mg/Kg)	Magnesio (mg/Kg)
3	4,5	0,2	15	234	2400	600

Según tabla 23. Estos valores concluyen que la disponibilidad de nutrientes es muy limitada.

Con esta información, se procedió a calcular la cantidad de fertilizante necesario para cada una de las macetas, y el método escogido para la aplicación fue ‘banda’. Este método consiste en concentrar el fertilizante durante la siembra, en un estilo de banda debajo de la semilla, teniendo en cuenta que no quede muy pegado de esta para evitar quemazón de la raíz.

El proceso de transporte de nutrientes se da por flujo de masa o por difusión. El flujo de masa es cuando los nutrientes se mueven desde las partes más húmedas, más alejadas de la raíz; hasta las menos húmedas, más cercanas de la raíz; de esta manera se mueve el calcio y la mayor parte del nitrógeno. La difusión, es cuando los nutrientes se mueven desde los puntos de mayor concentración alejados de las raíces, hasta los puntos de menor concentración cerca de estas; de esta manera se mueve el fósforo. (Arévalo de Gauggel, 2010)

La mitad de las macetas se les realizó el procedimiento anteriormente mencionado, y a la otra mitad ningún tipo de fertilización. Todas las macetas se regaban dos veces al día.

Observaciones:

- Las plantas no fertilizadas, presentaron un periodo vegetativo de 3 meses, hasta la salida del tallo, ramas y totalidad granos. Las plantas fertilizadas lograron esto en 2 meses y una semana. Este retardo se traduce en una deficiencia de nitrógeno.
- Las hojas de las plantas no fertilizadas se tornaron de color amarillento y violeta, mientras que las hojas fertilizadas, presentaron un color verde característico, durante todo su proceso vegetativo. Esto se traduce en una deficiencia de fósforo.
- Durante los días de gran sequía, aparecieron manchas en varias partes de la planta no fertilizada. Esto se traduce en una deficiencia de calcio.
- Las plantas no fertilizadas, fueron mucho más enanas que las otras.
- En los días de arduos vientos, las plantas no fertilizadas se movían demasiado y algunas rompieron sus tallos más jóvenes, mientras que las otras se mantuvieron firmes. Esto se traduce en déficit de sílice.
- Al momento de recoger los granos de las plantas no fertilizadas, se evidenció un 35% menos en comparación con la cantidad de granos de la planta fertilizada.



Figura 19. Macetas para el maíz.



Figura 20. Maceta con fertilizante.



Figura 21. Borla del maíz.



Figura 22. Mazorca.

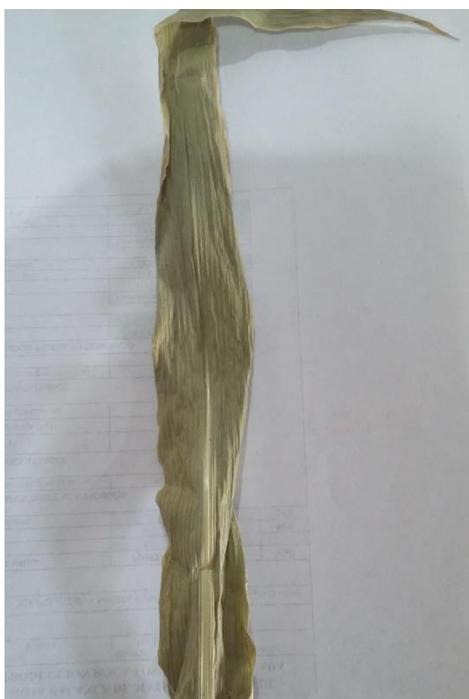


Figura 23. Hoja amarillenta.



Figura 24. Hoja violeta.



Figura 25. Maíz germinado.



Figura 26. Maíz en casa malla

De estas observaciones, se puede concluir que para un suelo ácido y con las características típicas de los suelos del departamento, el fertilizante obtenido se comporta de muy buena manera, con aportes nutricionales excelentes, visibles y que mejoran por completo el proceso vegetativo de la planta en todos sus puntos.

Capítulo 5

Conclusiones

- Se obtuvo un fertilizante que superó significativamente los niveles presentes en la roca fosfórica en estado natural; y que, en comparación con productos comerciales existentes, está en excelentes condiciones de competencia.
- Se estudió que la mejor alternativa de industrialización de la roca fosfórica de Fosfonorte S.A, es hacia la línea de elaboración de fertilizantes.
- Se logró llegar a la estandarización de un proceso de acidulación óptimo, con resultados esperados.
- Los productos obtenidos mostraron excelente comportamiento en la prueba de evaluación agronómica, dándole importantísimos aportes nutricionales a las plantas de maíz.
- Se evidenció que la granulometría de la partícula es de suma importancia a la hora de la reacción; entre más fina sea, mejor se comporta en la mezcla y entra en contacto con el ácido en mucho menor tiempo, solubilizando así la mayor cantidad de fósforo posible.
- Dado a que la reacción es exotérmica, se debe evaluar la posibilidad de implementar un lavador de gases, cuando estas mezclas se realicen a nivel industrial.
- El tiempo de curado para las rocas de malla 100, es de 15 días; y para malla 325 entre 1 y 5 días.

Bibliografía

- Anjorin, G., Oladipupo, J., Ayodele, S., & Agbaje, M. (2018). Phosphorus Releasing Characteristics of Ogun Phosphate Rock Acidulated with Cashew Nutshell Liquid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1563-1569.
- Arevalo de Gauggel, G. (2010). *Manual Fertilizantes y Enmiendas*. El Zamorano: Promipac.
- Bhattacharya, A. (2019). Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants. En A. Bhattacharya, *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants* (págs. 241-305). Kanpur: Academic Press.
- Camaño, A. y R. Melgar, 2015. *Fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre en maíz de alta productividad*. Est. Exp. Ag. Pergaminito Rev. Tecnología Agropecuaria V II N° 5 PP 11-14.
- Cantera, L. (2018). *Lignin-based coatings for controlled P-release fertilizer consisting of granulated simple superphosphate*. *Holzforschung*, 637-643.
- Castro, L., & Melgar, R. (2005). *Minerales para la agricultura en latinoamerica*. Buenos aires : Hugo Nielson, Roberto sarudiansky.
- Chien, S. (2003). Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock: a general review. In S.S.S. Rajan & S.H. Chien, eds. *Direct application of phosphate rock and related technology: latest developments and practical experiences*. Proc. Int. Meeting, Kuala Lumpur, 16-20 July 2001. Muscle Shoals, USA, IFDC. 441.
- Dodor, E. (2016). Relative Agronomic Effectiveness of Some African Rock Phosphate Fertilizers in an Ultisol of Okinawa, Japan. *West African Journal of Applied Ecology*.
- Echeverría, H. y F. García, 2015. *Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja*. Boletín Técnico No. 149. EEA INTA Balcarce. Centro Regional Buenos Aires Sur. ISSN 0522-0548.
- Farah, A., Salah, N., & Mustafa, M. (2014). Solubility Test of Partially Acidulated Sudanese Phosphate Rocks in conventional solvents. *Journal of natural and medical sciences*, 6.
- Guerrero Riascos, R. (2016). *Manual tecnico, Propiedades generales de los fertilizantes*. Bogotá: E.M.A.
- Hakam, A; Khoulood, M; & Zeroual, Y. (2012). Manufacturing of Superphosphates SSP & TSP from Down Stream Phosphates. *ELSEVIER*, 154-158.
- Hussain, I. (2012). The Operating experience of Nitrophosphate Plant. *ELSEVIER*, 172-177.

- Instituto colombiano agropecuario. (2011). *Comercialización de fertilizantes y acondicionadores de suelo*. Bogotá: produmedios.
- Instituto geográfico Agustín Codazzi. (2012). *Estudio de los conflictos de uso del territorio colombiano*. Bogotá: IGAC.
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2019). *Boletín agroclimático nacional*. Bogotá: A.F.M.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2016). *Política para la gestión sostenible del suelo*. Bogotá: Grupo de divulgación de conocimiento y cultura ambiental.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (UNIDO), Centro Internacional de Desarrollo de Fertilizantes (IFDC). (1998). *Fertilizer manual*. Vienna : Kluwer academic publishers.
- Owusu-Bennoah, E., Zapata, F. & Fardeau, J.C. (2002). Comparison of greenhouse and P isotopic laboratory methods for evaluating the agronomic effectiveness of natural and modified rock phosphates in some acid soils of Ghana. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 1-12.
- Rahman, M., Muhammad, D., Mussarat, M., & Sharif, M. (2018). Effect of acidulated levels and application techniques of rock phosphate on phosphorus use efficiency and yield of wheat in calcareous soil of Peshawar-Pakistan. *Pure And Applied Biology (PAB)*.
- Sampaio, M., Barreto, C., Wedisson, C., Santos, O., Carrijo, I., Melo, A., . . . Ferreira, R. (2018). Agronomic efficiency of phosphate fertilizers produced by the re-use of a metallurgical acid residue. *Journal of Environmental Management*, 1-7.
- Santos, W., Hesterberg, D., Mattielloc, E., Vergützd, L., Barreto, M., Silvaf, I., & Souza, L. (2016). Increasing Soluble Phosphate Species by Treatment of Phosphate Rocks with Acidic Waste. *Journal of Environmental Quality Abstract - Waste Management*.
- Williams, I. (1993). Rothamsted: Cradle of agricultural and apicultural research. *International Bee research asociation*, 20-26.
- Zapata Hernandez, R. D. (2004). *Química de la acidez del suelo*. Medellin: Cargraphis.

Anexos

Anexo A

Método de ensayo para la determinación cuantitativa de fósforo asimilable.

Método de extracción con agua y citrato de amonio.

La solución de citrato de amonio tiene un pH de 7.

- Se coloca 1 g de muestra sobre un papel de filtro, se adiciona agua lentamente alrededor de la periferia del papel de filtro en trayectoria circular, se debe asegurar que el agua se mezcle completamente con la muestra antes de una nueva adición.
- Se va recibiendo el filtrado en un matraz volumétrico de 500 ml, se coloca el papel de filtro con el residuo de fertilizante en un erlenmeyer de 200 ml que contienen 100 ml de solución de citrato de amonio previamente calentada a 65 °C.
- Se tapa herméticamente el erlenmeyer y se agita vigorosamente hasta que el papel de filtro se reduzca a pulpa, se disminuye la presión retirando el tapón momentáneamente; se tapa nuevamente y se continúa la agitación manteniendo la temperatura a 65 °C.
- Exactamente 1 hora después de agregar el papel de filtro con el residuo, se pasa cuantitativamente el contenido al matraz volumétrico de 500 ml; se enfría a temperatura ambiente, se lleva a volumen con agua destilada se mezcla y se deja en reposo por lo menos 2 h antes de tomar la alícuota.
- Se toma una alícuota de 10 ml en un matraz de 500 ml, y se le adicionan 10 ml de una mezcla de ácido nítrico – ácido perclórico.
- Se hierve vigorosamente hasta que el color verde amarillento desaparezca (20 min), se enfría y se adiciona 2 ml de ácido clorhídrico.

- Después de que la reacción cese, se continúa calentando por 5 minutos y se enfría.
- Se filtra y se procede a secar por 20 minutos a 250 °C en un crisol. Este será el precipitado.
- El contenido de fósforo asimilable se calcula con la siguiente ecuación:

$$\%P_2O_5 = \frac{0,01400 \times P \times V}{A \times M} \times \frac{PM(P_2O_5)}{2 \times PM(P)} * 100$$

P = peso del precipitado, en gramos.

A = volumen de la alícuota tomada, en mililitros.

M = peso de la muestra tomada en la alícuota, en gramos.

V = volumen final, en mililitros.

Peso molecular del P_2O_5 = 142 g/mol.

Dos veces el peso molecular del fósforo = 62 g/mol.