

**Comportamiento agronómico y absorción de nutrientes en Ryegrass aubade (*Lolium* sp.),
con NPK en interacción con silicio**

Harold Andrés Chañag Miramag

Universidad de Nariño

Centro de Investigaciones en Ciencias Agrarias

Maestría en Ciencias Agrarias con Énfasis en Producción de Cultivos

San Juan de Pasto

2022

**Comportamiento agronómico y absorción de nutrientes en Ryegrass aubade (*Lolium* sp.),
con NPK en interacción con silicio**

Harold Andrés Chañag Miramag

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Magister en Ciencias Agrarias con énfasis en Producción de Cultivos**

Presidente de tesis:

Hugo Ruiz Eraso Ph. D.

Universidad de Nariño

Centro de Investigaciones en Ciencias Agrarias

Maestría en Ciencias Agrarias con Énfasis en Producción de Cultivos

San Juan de Pasto

2022

Nota de Responsabilidad

“Las ideas y conclusiones aportadas en este Trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1ro N°324 de octubre 11 de 1966 emanado por el Honorable Consejo Superior de la Universidad de Nariño.

Nota de Aceptación

Hernán Burbano Orjuela Ph.D.

Jurado

Jairo Mosquera Guerrero Ph. D.

Jurado

Jorge Vélez Lozano Ph.D.

Jurado

Hugo Ruiz Eraso Ph.D.

Presidente

San Juan de Pasto, mayo de 2022

Dedicatoria

A la memoria de mi abuela

A mis abuelos

A mis padres por la vida, ser los guías y el apoyo incondicional en este camino

A mi hermana por su compañía en todo momento

Agradecimientos

A la Universidad de Nariño y a los docentes de la Maestría en Ciencias Agrarias por compartir sus conocimientos aportando a mi formación profesional y personal.

A la Fundación CEIBA y la Gobernación de Nariño por la financiación de mis estudios de maestría.

Sinceros agradecimientos al director de esta investigación Hugo Ruiz Eraso Ph. D; por el tiempo, el apoyo incondicional, la confianza brindada y por compartir sus valiosos conocimientos.

A los jurados Hernan Burbano Ph.D, Jorge Velez, Ph.D y Jairo Mosquera Ph.D por sus aportes y sugerencias.

A todo el personal de la Granja Experimental en Ganado de Leche Chimangual por la ayuda desinteresada.

Al personal de laboratorios de la Universidad de Nariño por el apoyo, tiempo y conocimientos compartidos.

A mi familia y amigos que contribuyeron en la culminación de este trabajo, gracias.

Resumen

La investigación evaluó diferentes niveles de NPK en interacción con silicio midiendo variables de rendimiento, índices de crecimiento, absorción de nutrientes y coeficientes de uso de nutrientes y agua; se desarrolló en la granja experimental en ganado de leche Chimangual de la Universidad de Nariño, localizada en el municipio de Sapuyes, ubicada a 3.154 msnm con una temperatura promedio de 10°C y una precipitación media anual de 1200 mm. El diseño experimental empleado fue bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas donde se evaluaron cuatro niveles de NPK (381 – 156 – 89, 286 – 117 – 67 y 190 – 78 – 44 kg ha⁻¹) y tres niveles de Si (100, 75 y 50 kg ha⁻¹) y un control (0 kg ha⁻¹) para un total de 12 tratamientos con cuatro repeticiones.

Los resultados mostraron que el nivel de 381 – 156 – 89 kg ha⁻¹ de NPK en interacción con 75 kg ha⁻¹ de Si, presentó los mejores resultados para producción de forraje verde con 44.67 t ha⁻¹, y 5.38 t ha⁻¹ en producción de materia seca. Para la altura de planta el mejor resultado lo presentó el tratamiento de 381 – 156 – 89 kg ha⁻¹ de NPK en interacción con 50 kg ha⁻¹ de Si con 84.03 cm. Para los índices de crecimiento los mejores resultados se presentaron para el nivel 381 – 156 – 89 kg ha⁻¹. Los niveles de absorción de nitrógeno, fósforo y potasio resultaron potenciados por la presencia de Si en la fertilización, mostrado un incremento de la absorción de estos elementos cuando el nivel de NPK fue de 381 – 156 – 89 kg ha⁻¹ en interacción con 75 kg ha⁻¹ de Si. Finalmente, los coeficientes de utilización de nutrientes y agua, mostraron que la eficiencia nutricional del cultivo se ve favorecida por la presencia de Si en la fertilización y que varía dependiendo de los niveles de NPK aplicados.

Abstract

The research evaluated different levels of NPK in interaction with silicon by measuring yield variables, growth rates, nutrient uptake, and nutrient and water use coefficients; This research was carried out at the Chimangual dairy cattle experimental farm of the University of Nariño, located in the municipality of Sapuyes, located at 3,154 meters above sea level with an average temperature of 10°C and an average annual rainfall of 1,200 mm. The experimental design used was a randomized complete block with an arrangement in split plots where four levels of NPK (381 – 156 – 89, 286 – 117 – 67 and 190 – 78 – 44 kg ha⁻¹) and three levels of Si (100, 75 and 50 kg ha⁻¹) and a control (0 kg ha⁻¹) for a total of 12 treatments with four repetitions.

The results showed that the level of 381 – 156 – 89 kg ha⁻¹ of NPK in interaction with 75 kg ha⁻¹ of Si, presented the best results for green forage production with 44.67 t ha⁻¹, and 5.38 t ha⁻¹. 1 in dry matter production. For plant height, the best result was presented by the treatment of 381 – 156 – 89 kg ha⁻¹ of NPK in interaction with 50 kg ha⁻¹ of Si with 84.03 cm. For the growth indices, the best results were presented for the level 381 – 156 – 89 kg ha⁻¹. The absorption levels of nitrogen, phosphorus and potassium were enhanced by the presence of Si in the fertilization, showing an increase in the absorption of these elements when the NPK level was 381 – 156 – 89 kg ha⁻¹ in interaction with 75 kg ha⁻¹ of Si. Finally, the nutrient and water utilization coefficients showed that the nutritional efficiency of the crop is favored by the presence of Si in the fertilization and that it varies depending on the levels of NPK applied.

Contenido

	pág.
Introducción	14
1. Objetivos	16
1.1 Objetivo general	16
1.2 Objetivos Específicos	16
2. Marco Teórico	17
2.1 Requerimientos edafoclimáticos para el manejo de los pastos	17
2.2 Requerimiento hídrico	17
2.3 Temperatura	17
2.4 Fertilización En Praderas	18
2.4.1 Aspectos generales de la fertilización en praderas.	18
2.4.2 Nitrógeno en praderas.	18
2.4.3 Fósforo en praderas.	18
2.4.4 Potasio en praderas.	19
2.4.5 Silicio en la agricultura.	20
2.5 La fertilización y su influencia en la translocación y nutrición de las praderas.....	21
2.5.1 Curvas de absorción de nutrientes.	21
2.5.2 Coeficiente de Utilización Biológica (CUB).	22
2.5.3 Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN).	23
2.5.4 Eficiencia de Uso de Agua (EUA).	24
3. Materiales y métodos	25
3.1 Localización	25

3.2 Características del suelo	25
3.3 Material vegetal	26
3.4 Registro de información climática	27
3.5 Diseño experimental.....	27
3.6 Distribución tratamientos en campo.....	28
3.7 Variables Evaluadas	29
4. Resultados y discusión	33
4.1 Resultados para producción de forraje verde (PFV), producción de materia seca (PMS), altura de planta (AP) e índice de área foliar (IAF).....	34
4.2 Producción de forraje verde (PFV), materia seca (PMS) y altura de planta (AP)	35
4.3 Índice de Área Folia (IAF)	39
4.4 Índices de crecimiento.....	40
4.5 Índices fisiológicos Tasa de Crecimiento Acumulada (TCA), Tasa de Crecimiento Relativa (TCR) y Tasa de Acumulación Neta (TAN).	43
4.6 Curvas de absorción de nutrientes.....	48
4.7 Absorción de silicio.....	54
4.8 Coeficiente de Utilización Biológica (CUB)	56
4.9 Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN).....	58
4.10 Eficiencia de Utilización de Agua (EUA).....	62
4.11 Análisis económico	64
Conclusiones	67
Referencias.....	68
Anexos	80

Lista de tablas

	pág.
Tabla 1. Caracterización área experimental	26
Tabla 2. Ficha técnica pasto ryegrass aubade	27
Tabla 3. Dosis correspondientes parcelas principales y subparcelas	28
Tabla 4. Metodología utilizada para determinación de NPK y Si de tejido vegetal.	31
Tabla 5. Cuadrados medios para las variables PFV, PMS, AP e IAF en los cortes de mayo, julio y agosto.....	34
Tabla 6. Cuadrados medios para peso de planta y área foliar a 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización.	40
Tabla 7. Cuadrados medios índices de crecimiento TCA, TCR y TAN	44
Tabla 8. Cuadrados medios para curvas de absorción de nutrientes NPK.....	49
Tabla 9. Cuadrados medios absorción de silicio por planta (40 días después del corte de uniformización).....	55
Tabla 10. Cuadrados medios de los valores de Coeficiente de Utilización Biológica (CUB). Para los elementos nutricionales N, P y K en los diferentes cortes evaluados.	56
Tabla 11. Cuadrados medios de los valores de Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN) Para los elementos nutricionales N, P y K en los diferentes cortes evaluados.	58
Tabla 12. Cuadrados medios para Eficiencia de Utilización de Agua (EUA)	62
Tabla 13. Análisis económico	66

Lista de figuras

	pág.
Figura 1. Distribución aleatoria de los tratamientos en las parcelas principales (niveles de NPK) y en las sub parcelas (niveles de si), bajo un diseño de parcelas divididas con cuatro repeticiones	29
Figura 2. Precipitación acumulada y temperatura media de enero a septiembre de 2020	33
Figura 3. Grafica de interacción de factores para producción de forraje verde – PFV	37
Figura 4. Grafica de interacción de factores para producción de materia seca – PMS.....	37
Figura 5. Grafica de interacción de factores para altura de planta – AP.....	38
Figura 6. Incremento de masa seca a través del tiempo después del corte de uniformización	42
Figura 7. Incremento del área foliar a través del tiempo después del corte de uniformización.....	42
Figura 8. Tasa de Crecimiento Absoluta (TCA) para diferentes niveles de NPK	45
Figura 9. Tasa de Crecimiento Absoluta (TCR) para diferentes niveles de NPK	45
Figura 10. Tasa de Asimilación Neta (TAN) para diferentes niveles de NPK	46
Figura 11. Grafica de interacción de factores, absorción de nitrógeno 40 DDU	50
Figura 12. Grafica de interacción de factores, absorción de fósforo 40 DDU.....	51
Figura 13. Grafica de interacción de factores, absorción de potasio 40 DDU.....	51
Figura 14. Curva de absorción nitrógeno.....	53
Figura 15. Curva de absorción fósforo.....	53
Figura 16. Curva de absorción de potasio.....	54

Lista de anexos

	pág.
Anexo A. Medias para las variables producción de forraje verde (PFV), producción de materia seca (PMS) y altura de planta (AP) para la interacción de niveles de NPK y Si.....	80
Anexo B. Comparación de medias corte de agosto para las variables producción de forraje verde y producción de materia seca para niveles de NPK.	81
Anexo C. Comparación de medias IAF para niveles de NPK en el corte de mayo	82
Anexo D. Comparación de medias para peso de planta y área foliar a 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización.....	83
Anexo E. Comparación de medias para los índices de crecimiento TCA, TCR y TAN	84
Anexo F. Medias para NPK en interacción con silicio a los 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización.	85
Anexo G. Comparación de medias para NPK en interacción con silicio a los 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización.....	87
Anexo H. Comparación de medias de Coeficiente de Utilización Biológica (CUB).....	88
Anexo I. Comparación de medias de Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN)	89
Anexo J. Comparación de medias de Eficiencia de Utilización de Agua (EUA)	90

Introducción

El ryegrass aubade (*Lolium* sp.) actualmente, es uno de los forrajes más representativos en la alimentación bovina debido principalmente a su gran desarrollo, su elevada productividad, su precocidad y su calidad nutritiva. La incorporación de ryegrass aubade dentro de los sistemas de alimentación animal la zona andina del departamento de Nariño se debe principalmente a que estos una mejor adaptabilidad a condiciones adversas de temperatura (Fulkerson et al., 2007; Legarda Lopez et al., 2015). Así, la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria – UPRA (2019) caracterizó 282.927 hectáreas aptas para este cultivo donde 57.616 se concentran en el trópico alto del departamento.

Sin embargo, los raigrases tienen mayor requerimiento en la calidad química y física del suelo, en los niveles de fertilización, contenido de humedad y en el manejo del pastoreo (Guerrero, 1998). La incorporación de esta especie a los sistemas de producción en el trópico de altura, requieren la evaluación de estrategias de manejo que permitan potenciar las respuesta productiva y composicional de este forraje (Vargas- Martínez et al., 2018).

La fertilización es uno de los factores de mayor importancia en el cultivo de pastos, entendiendo que esta práctica permite asegurar un determinado nivel de rendimiento, cuando otros factores del suelo son limitantes para el desarrollo de las plantas (Pérez Vélez, 2014). Uno de los elementos benéficos que ha demostrado potenciar el rendimiento y calidad de los forrajes está el silicio, uno de los elementos más abundante en la naturaleza, pero uno de los menos utilizados por desconocimiento en términos de potenciar la fertilización y nutrición de las plantas, sobre todo por la interacción con el aluminio formando hidroxialuminiosilicatos (HAS), los cuales se precipitan, permitiendo así una mayor liberación y asimilación del fósforo en los cultivos. Diferentes trabajos científicos realizados por los centros de investigación más importantes del mundo han demostrado

que dentro de un plan de fertilización eficiente se debería incluir el silicio, ya que puede mejorar los efectos perjudiciales de muchos tipos de estrese abióticos (por ejemplo, metales pesados, deficiencia y desequilibrio de nutrientes, sal, sequía, temperaturas extremas, radiación UV-B) y bióticos (por ejemplo, plagas y enfermedades), estimulando así el crecimiento de las plantas (Hodson & Sangster, 2002; Pontigo et al., 2017; WANG & PENG, 2017).

Por lo anterior esta investigación tuvo como objetivo evaluar el comportamiento del pasto ryegrass aubade (*Lolium* sp.) bajo diferentes niveles de NPK en interacción con silicio (Si), determinar las curvas de absorción de nutrientes y evaluar variables nutricionales, que permitan optimizar la producción del cultivo y la rentabilidad del sistema de producción de leche.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento agronómico y la absorción de nutrientes del pasto Ryegrass aubade (*Lolium sp.*), bajo diferentes niveles de NPK en interacción con Silicio (Si) en la zona alto andina del departamento de Nariño.

1.2 Objetivos Específicos

- Evaluar variables de rendimiento del pasto ryegrass aubade (*Lolium sp.*) bajo tres dosis de NPK en interacción con tres dosis de Si y un testigo, en tres épocas consecutivas.
- Determinar las curvas de absorción de nutrientes del pasto ryegrass aubade (*Lolium sp.*) y su relación con las propiedades químicas y físicas del suelo.
- Evaluar variables nutricionales del pasto ryegrass aubade (*Lolium sp.*), a través de los Índices de Coeficiente de Utilización Biológica (CUB), Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN) y Coeficiente de Uso de Agua (CUA).
- Realizar análisis económico de la dosificación de silicio en interacción con la dosificación de NPK y la producción de forraje verde.

2. Marco Teórico

2.1 Requerimientos edafoclimáticos para el manejo de los pastos

Los raigrases presentan un amplio rango de adaptación; se establecen en clima frío, se adaptan en zonas comprendidas entre los 2000 y 3200 msnm, con gran variabilidad de suelos, con mediana a alta fertilidad, pH entre 5.5 a 7.0, textura franca, aunque tolera suelos pesados (Dimate, 2016); sin embargo, en este tipo de suelos tienden a desaparecer en un periodo relativamente corto. En suelos livianos se desarrollan bien, pero son fácilmente arrancados en maniobras de corte o por los animales. Las mejores producciones se obtienen en suelos francos o franco arcillosos (Legarda Lopez et al., 2015).

2.2 Requerimiento hídrico

Los raigrases son muy exigentes en humedad, para un normal desarrollo se requieren entre 12 y 25 mm de precipitación o riego por semana (700 a 1300 mm/año). En casi todas las zonas de clima frío es necesario aplicar riego, por lo menos durante algunos períodos del año. Los ryegrases no soportan el nivel freático demasiado alto, el encharcamiento prolongado ni el exceso de humedad en el suelo. En suelos muy húmedos se restringe el desarrollo de las raíces y las plantas mueren tempranamente (Guerrero, 1998).

2.3 Temperatura

Los ryegrasses son muy resistentes a las heladas y se pueden cultivar incluso en alturas de hasta 3.600 msnm con temperaturas promedias de 6 a 8 °C. Con alturas mayores y temperaturas inferiores el desarrollo es muy pobre. En estas zonas las enfermedades, especialmente la roya, atacan con bastante intensidad, contribuyendo a acortar aún más la vida útil de la pradera (Guerrero, 1998).

2.4 Fertilización en Praderas

2.4.1 Aspectos generales de la fertilización en praderas.

En general nitrógeno, fósforo y potasio, son los elementos a los que se les ha dado mayor importancia en cuanto al requerimiento nutricional en diferentes suelos y especies de pasto. Los requerimientos para el mantenimiento de pasturas pueden variar de acuerdo al estado nutricional del suelo que puede cambiar con el tiempo, debido a la remoción del sistema, reciclaje y/o a pérdidas tales como lixiviación y fijación (Pirela, 2005).

2.4.2 Nitrógeno en praderas.

El nitrógeno es un nutriente de gran valor en todos los ecosistemas, la gran reserva de nitrógeno en el suelo ocurre en forma orgánica, como parte de la materia orgánica del suelo, la mineralización de la materia orgánica libera N inorgánico el cual constituye la principal fuente de N para las plantas en muchos sistemas agrícolas. La planta absorbe N del suelo principalmente en forma de nitrato (NO_3^-), pero también puede absorber en forma de amonio (NH_4^+). Este nutriente es muy móvil dentro de la planta. En su mayoría el N se mueve en el suelo por flujo de masa, es decir el movimiento es mediado por el movimiento del agua a través del suelo hacia la raíz de las plantas (Cantarella, 2007; Steudle & Peterson, 1998). Entre las funciones que el nitrógeno desempeña en la planta está formar parte de las proteínas, clorofila, alcaloides y enzimas responsables de regular el crecimiento y la formación del material vegetal.

La concentración de N en la materia seca varía entre 1 y 5%. En pastos se considera alto un contenido mayor al 4% y bajo cuando es inferior al 2.9% (Bernal & Espinosa, 2003).

2.4.3 Fósforo en praderas.

El fósforo es absorbido por la planta principalmente como ion ortofosfato primario (HPO_4), pero también se absorbe como ion fosfato secundario (HPO_4) por medio de difusión a través de

gradientes de concentración en la solución del suelo y en la raíz de la planta. Es un elemento poco móvil en el suelo debido a sus reacciones de fijación a las superficies de arcillas y óxidos y el recambio biológico dado por procesos de mineralización-inmovilización y solubilización dependientes de la actividad microbiana (Balta Crisólogo et al., 2015; Stevenson F.J. & Cole, 1999).

Este nutriente forma parte de las nucleoproteínas lipoides y fosfolípidos. Además, desempeña un importante papel metabólico en la respiración y fotosíntesis (fosforilación), en el almacenamiento y la transferencia de energía (NAD, NADP y ATP) y en la división y crecimiento celular. El P se acumula en partes de la planta en crecimiento y en las semillas. Es determinante para el desarrollo de las raíces y de los tejidos meristemáticos, por lo cual es importante durante el desarrollo vegetativo de los pastos. El P es absorbido del suelo como iones de H_2P_4^- y HPO_4^{2-} .

El rango de concentración de P en la materia seca de las plantas varía entre 0.1 y 0.5 g por cada 100 g de materia seca. Se considera que un forraje es deficiente cuando el contenido es inferior al 0.21% y alto cuando es superior al 0.44% (Bernal & Espinosa, 2003).

2.4.4 Potasio en praderas.

El potasio es uno de los elementos esenciales más abundantes en la corteza terrestre, este es absorbido por la planta en forma de ion K^+ , presenta una movilidad media en el suelo, su movimiento hacia la planta se puede dar por flujo de masa y difusión. El potasio es vital en la fotosíntesis y en la activación de más de 60 sistemas enzimáticos en las plantas, pero no está involucrado directamente en la estructura de las células. Es muy importante para mantener la presión osmótica y para neutralizar cargas eléctricas dentro de la célula. Su alta movilidad permite que se traslade rápidamente de célula a célula, de tejido viejo a tejido nuevo en desarrollo, o a los

órganos de almacenamiento. El potasio es muy móvil dentro de la planta y es absorbido del suelo como catión K^+ (Ernani et al., 2007).

El potasio es el nutriente que los pastos toman en mayor cantidad del suelo, llegando incluso a acumularse cantidades superiores a las del nitrógeno. El rango de concentración de K en la materia seca de las plantas varía entre 0.2 al 5%. Para la mayoría de los forrajes se considera que es deficiente cuando el contenido es inferior al 1.96% y alto cuando es superior al 3.08% (Bernal & Espinosa, 2003).

2.4.5 Silicio en la agricultura.

El Si es un metaloide tetravalente y el segundo elemento más abundante tanto en la superficie de la Tierra, y comprende aproximadamente el 28% de la corteza terrestre (Epstein, 1994). Sin embargo, la mayoría del silicio existe en el suelo en forma de aluminosilicatos cristalinos insolubles, que no están disponibles directamente para las plantas (Liang et al., 2015; Richmond & Sussman, 2003). El ácido monosilícico, la forma soluble de Si en la solución del suelo, que podría ser absorbida por la raíz de la planta, se presenta como una molécula monomérica no cargada (H_4SiO_4) a valores de pH que varían de 2 a 9 (Knight & Kinrade, 2001). La concentración de ácido monosilícico disponible en la planta varía de 0.1 a 0.6 mmol L^{-1} en solución de suelo, que es, por ejemplo, cien veces mayor que el fósforo disponible en la planta (Epstein, 1994, 1999; Havlin et al., 2017).

El silicio, puede atenuar los efectos perjudiciales de muchos estreses abióticos (metales pesados, deficiencia y desequilibrio de nutrientes, sal, sequía, temperaturas extremas, radiación UV-B) y bióticos (plagas y enfermedades), estimulando así el crecimiento de las plantas (Adrees et al., 2015; Coskun et al., 2016; Guntzer et al., 2012; Hernandez-Apaolaza, 2014; Liang et al.,

2007; Ma, 2004; Pontigo et al., 2015; Van Bockhaven et al., 2012; WANG & PENG, 2017; Zhu & Gong, 2014)

Además, se ha demostrado que el silicio es un elemento esencial para mejorar el rendimiento y las cualidades de un gran grupo de cultivos (Alvarez & Datnoff, 2001; Vulavala et al., 2016), en gran parte debido a la interacción que tiene con el fósforo no lábil, permitiendo mayor asimilación de este elemento en los cultivos.

La aplicación de fertilizantes con silicio es una práctica bastante común y rutinaria en países como China, Japón, Corea, Brasil, EE. UU., especialmente en zonas con poca disponibilidad de fósforo o del mismo silicio, para lograr una producción sostenible (Liang et al., 2015; Ma & Takahashi, 2002).

2.5 La fertilización y su influencia en la translocación y nutrición de las praderas

2.5.1 Curvas de absorción de nutrientes.

El desarrollo de las curvas de absorción de nutrimentos en pastos es el primer paso para entender la relación entre los nutrimentos presentes en el suelo y en la parte foliar, debido a que estas curvas, describen por medio de una gráfica la extracción de un nutriente que hace el cultivo y permite conocer las cantidades de este elemento que fue extraída por la planta durante su ciclo de vida (Sancho, 1993).

La extracción de los nutrientes depende de diferentes factores tanto internos como externos, siendo los más importantes: el potencial genético de la planta (eficiencia), la edad de la planta o estado de desarrollo de la misma y el ambiente en que crece (nutrientes del sustrato, temperatura, humedad, brillo solar). Estos factores se asocian a la prefloración, la floración y la fructificación de una planta o cultivo y en conjunto proporcionan las razones que sirven para visualizar la importancia de relacionar las curvas de absorción con las curvas de crecimiento del cultivo, para

establecer así las relaciones entre los patrones de crecimiento y los requerimientos nutricionales (F Bertsch, 1981).

A través de las curvas de absorción, se determinan las épocas más idóneas para la aplicación de fertilizantes, ya que las mismas se pueden realizar ligeramente antes de los momentos de mayor absorción. Las curvas son una herramienta útil para tener una idea aproximada de la cantidad de nutrimentos totales que la planta necesita para su desarrollo, así como para definir los programas de fertilización para el cultivo y maximizar el aprovechamiento de los fertilizantes. Además, estas curvas permiten conocer la calidad nutritiva de los productos o frutos, en cuanto a contenidos de nutrientes para el consumo humano o animal (Sancho, 1998) y calcular la cantidad de nutrimentos que se debe reponer, debido a que salen del sistema como producto vendible, y sincronizarlos para que se aplique el producto cuando la planta lo necesite; por esto son importantes las curvas de absorción de nutrimentos, como las recopiladas por Bertsch (2009).

Bertsch (1981) señala que desde el punto de vista agronómico, los análisis de absorción de nutrimentos son de gran utilidad, en tanto se profundice en la interpretación de los resultados obtenidos, los cuales proporcionan información que permite explicar las diferencias por efecto de nutrimentos desde un punto de vista más fisiológico, llegando a señalar quizás de una manera más específica y eficiente la época de mayor efecto y el tipo de acción ejercida por el nutrimento sobre la planta.

2.5.2 Coeficiente de Utilización Biológica (CUB).

CUB es el coeficiente de utilización biológica, a través de este, puede calcularse la eficiencia nutricional de la planta. El valor del CUB expresa la cantidad de nutriente absorbida por la planta con respecto a la cantidad aplicada en relación a su productividad (Mendes, 2006). Otros autores como Freire y colaboradores (2004) definen el CUB a través del cálculo de la eficiencia nutricional

de la planta, expresándose por kilogramos de materia seca producida por kilogramos de nutriente acumulado. Según este autor para realizar un adecuado balance nutricional bajo un criterio económico y de buen rendimiento es necesario realizar un modelo calculando los siguientes parámetros: CUB (Coeficiente de utilización biológica), P-rem (fósforo remanesciente), Tasa de recuperación de la planta, Demanda nutricional, Tasa de recuperación del extractor, Nivel crítico, Disponibilidad en el suelo y Balance de nutrientes. Los valores de CUB son influenciados por factores edafoclimáticos, biológicos y de manejo, afirmando, en general, que para una misma productividad, plantas con valor de CUB más alto de determinado nutriente son más eficientes que las plantas con valor de CUB más bajo. Los valores de CUB son expresados en kg/kg e indican la producción de materia seca por unidad de nutriente acumulada, representando en la práctica una medida de eficiencia de la planta en convertir nutriente absorbido en materia seca (Barros et al., 1986).

$$CUB = \frac{[Peso\ producido\ de\ biomasa\ seca\ (Kg)]}{[Concentración\ de\ Nutriente\ acumulado\ en\ la\ Biomasa\ (Kg)]}$$

2.5.3 Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN).

Dibb (2000) define la Eficiencia de Uso de Nutrientes como un coeficiente que permite la optimización como parte del sistema total de producción y esto a su vez maximiza la Eficiencia de Uso de la Tierra y el retorno económico a los insumos utilizados, mientras que al mismo tiempo se protege al ambiente. Por otra parte Dobermann (2007) y Stewart (2007) definen la eficiencia de recuperación como los kg de incremento en absorción sobre los Kg de nutriente aplicado. Según Grahmann et al., (2013) la fórmula más utilizada y sencilla de calcular y la que se usará en este estudio es:

$$EUN = \frac{[Cantidad\ en\ Peso\ Nutriente\ absorbido\ por\ la\ planta]}{[Cantidad\ en\ Peso\ del\ elemento\ aplicado]}$$

2.5.4 Eficiencia de Uso de Agua (EUA).

La eficiencia del uso de agua (EUA), se define por la relación entre los gramos de agua suministrada a un cultivo y los gramos de materia seca producidos. Es de destacar que los cultivos difieren en su capacidad para extraer agua, de acuerdo con su metabolismo, la arquitectura de sus hojas, y el momento del ciclo de crecimiento considerado (Medrano et al., 2007). Y está dada por la siguiente fórmula:

$$EUA = \frac{[Peso\ producido\ en\ biomasa\ seca]}{[Cantidad\ en\ Peso\ de\ agua\ aplicada]}$$

3. Materiales y métodos

3.1 Localización

Las actividades de campo se llevaron a cabo en la Granja Experimental en Ganado de Leche Chimangual propiedad de la Universidad de Nariño, ubicada en el municipio de Sapuyes, Nariño. Localizada a 1°02'35,59'' N 77°45'14,20'' O, a una altura de 3154 msnm con una temperatura promedio de 10°C y una precipitación media anual de 1200 milímetros. De acuerdo con Holdridge, corresponde a la zona de vida de bosque húmedo montano (Bh-M) (Holdridge, 1978); el suelo es clasificado como *Typic haplustands* dentro del orden de los andisoles..

La fase de laboratorios fue desarrollada en las dependencias de suelos de prácticas académicas y los laboratorios especializados de la Universidad de Nariño, sede Torobajo, ubicados a 2450 msnm con una temperatura promedio de 18°C.

3.2 Características del suelo

Previo a la implementación del experimento se realizó una caracterización tanto química como física del área experimental, los resultados se presentan en la tabla 1. Se encontró con un suelo de textura franco – arenosa con una densidad aparente de 0.65 g cm⁻³, con un porcentaje de materia orgánica alta con 21.5, un nivel de fósforo alto con 30.7 mg kg⁻¹ y un nivel de potasio alto con 0.95 cmol⁺ kg⁻¹, con un pH de 4.57 indicando un suelo extremadamente ácido (Tabla 1). De acuerdo a los resultados obtenidos se ajustó el plan de fertilización para la producción de 120 t ha⁻¹ de forraje verde, con el cual se determinó la aplicación de 432 kg ha⁻¹ de nitrógeno, 110 kg ha⁻¹ de fósforo y 480 kg ha⁻¹ de potasio. Teniendo en cuenta las cantidades requeridas para fertilizar se seleccionó fuentes simples debido a que presentan una mayor concentración de nutriente por cada 100 kilogramos de fertilizante, de este modo se utilizó Urea (46-0-0) como fuente de nitrógeno, DAP (18-46-0) como fuente de nitrógeno y fósforo y KCl (0-0-60) como fuente de potasio.

Tabla 1.

Caracterización área experimental

Parámetro	Método	Técnica	Unidad de medida	Resultado
Densidad aparente	Probeta graduada	Gravimétrica	$\text{g (cm}^3\text{)}^{-1}$	0.65
pH, Potenciometro	NTC 5264	Potenciométrica		4.57
Relación Suelo:Agua				
Materia Orgánica	Walkley-Black (Colorimétrico) NTC5403	Espectrofotometrica uv-vis	%	21.5
Fósforo disponible	Bray y Kurtz NTC 5350	Espectrofotometrica uv-vis	mg kg^{-1}	30.7
Capacidad de Intercambio Cationico (CIC)	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1NpH7 NTC5268	Volumétrica	$\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$	45.6
Calcio de Cambio	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1NpH7	Espectrofotométrica de absorción		4.23
Magnesio de Cambio	NTC5349	atómica		0.86
Potasio de Cambio				0.95
Aluminio de Cambio	Extracción KCl 1N	Volumétrica		1.48
Textura	Bouyoucos			Franco - Arenoso

Fuente. Este estudio

3.3 Material vegetal

En la presente investigación se trabajó con semilla comercial certificada de pasto ryegrass aubade *Lolium* sp. (Tabla 2), utilizando una densidad de siembra de 50 kg ha^{-1} .

Tabla 2.

Ficha técnica pasto ryegrass aubade

Nombre común	Ryegrass
Nombre científico	<i>Lolium</i> sp.
Base genética	Anual Tetraploide
Densidad de siembra	75 – 100 lb ha ⁻¹
Adaptación	2200 – 3200 msnm
Días a germinación	5 – 7
Tiempo al primer pastoreo o corte	65 – 90 días
Tiempo de rotación en días	28 – 40 días
Rango de pH	5.0 – 8.0
Precipitación en milímetros mes	100 mm
Tolerancia a Roya (<i>Puccinia</i> spp.)	Buena
Producción de forraje verde por corte	28– 35 t ha ⁻¹

Fuente. Este estudio

3.4 Registro de información climática

El monitoreo y registro de la información climática (precipitación acumulada y temperatura media) se tomó de la estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 ubicada en el Granja Experimental en Ganado de Leche Chimangual. En la figura 1 se muestra la precipitación acumulada y temperatura media desde enero a septiembre de 2020, periodo donde se realizó la investigación.

3.5 Diseño experimental

El diseño experimental implementado fue bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas, el modelo estadístico del diseño en parcelas divididas es el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + B_k + P_i + (B \times P)_{ki} + S_j + (P \times S)_{ij} + [(B \times S)_{kj} + (B \times P \times S)_{kij}]$$

Dónde:

Y_{ijk} = variable de respuesta asociada a la parcela principal i, subparcela j, bloque k.

μ = efecto de la media general del experimento

B_k = efecto del bloque k

P_i = efecto de la parcela principal i

$(B \times P)_{ki}$ = error *a* (interacción del bloque *k* por la parcela principal *i*)

S_j = efecto de la subparcela *j*

$(P \times S)_{ij}$ = interacción de la parcela principal *i* por la subparcela *j*.

$[(B \times S)_{kj} + (B \times P \times S)_{kij}]$ = error *b*

El experimento contó con cuatro repeticiones donde el primer factor (parcelas principales) corresponde a los tres niveles de NPK y el segundo factor (subparcelas) corresponde a cuatro niveles de Si (Tabla 3 y Figura 1), para un total de 48 unidades experimentales.

Los niveles establecidos para los niveles de NPK y Si se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Dosis correspondientes parcelas principales y subparcelas

Parcelas principales	
100 % NPK	381 – 156 – 89 kg ha ⁻¹
75% NPK	286 – 117 – 67 kg ha ⁻¹
75% NPK	190 – 78 – 44 kg ha ⁻¹
Subparcelas	
100% Si	100 kg ha ⁻¹
75% Si	75 kg ha ⁻¹
50% Si	50 kg ha ⁻¹
0% Si	0 kg ha ⁻¹

Fuente. Este estudio

3.6 Distribución tratamientos en campo

La distribución de los tratamientos se detalla en el mapa de campo (Figura 2).



Figura 1. Distribución aleatoria de los tratamientos en las parcelas principales (niveles de NPK) y en las sub parcelas (niveles de Si), bajo un diseño de parcelas divididas con cuatro repeticiones

Fuente. Este estudio

3.7 Variables Evaluadas

- **Objetivo 1.** Evaluar el comportamiento agronómico del pasto ryegrass aubade (*Lolium* sp.) frente a la fertilización con silicio y su interacción con dosis de macronutrientes (NPK)

Producción de forraje verde (PFV) y materia seca (MS): Se realizaron cuatro el aforos al azar dentro de la unidad experimental con un cuadro de dimensiones de 50 cm x 50 cm, posteriormente se pesó la producción (kg) se transformó a toneladas por hectárea ($t \cdot ha^{-1}$). Una vez se obtenido el peso del aforo en fresco se secó el material vegetal a $65^{\circ}C$ por 48 horas y se pesó nuevamente ($t \cdot ha^{-1}$) para calcular el porcentaje de materia seca y así calcular la producción en materia seca (Cortés y Viveros, 1975).

Altura de planta (AP): Se realizó la medición de cuatro plantas por cada uno de los aforos desde la base de la planta hasta la última hoja formada (Villalobos & Sánchez, 2009).

Índice de área foliar (IAF): Para la determinación del índice de área foliar realizó el muestreo destructivo de seis plantas por unidad experimental, de las cuales se realizó un registro fotográfico de la totalidad de las hojas fotosintéticamente activas. Para el cálculo del área foliar de cada planta se utilizó el software ImageJ 1.45s (Wayne Rasband, National Institutes of Health, Bethesda, MD). Finalmente, el IAF se determinó por la siguiente fórmula:

$$IAF = \frac{(\text{Área foliar}) \times (\text{Densidad de población})}{(\text{Área sembrada})}$$

(Rodríguez *et al.*, 2000)

Para la determinación de los índices de crecimiento como tasa de crecimiento acumulada, tasa de crecimiento relativa y tasa de asimilación neta, se realizó un muestreo destructivo de cinco plantas en cada unidad experimental a los 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización, estas plantas se secaron a 65°C por 48 horas y posteriormente se pesaron. Finalmente, con los datos obtenidos se calcularon los índices de crecimiento por medio de las siguientes fórmulas.

Tasa de crecimiento acumulada (TCA):

$$TCA = \frac{\text{masa seca final} - \text{masa seca inicial}}{\text{tiempo final} - \text{tiempo inicial}}$$

(Radford, 1967).

Tasa de crecimiento relativa (TCR):

$$TCR = \frac{\ln \text{masa seca final} - \ln \text{masa seca inicial}}{\text{tiempo final} - \text{tiempo inicial}}$$

(Radford, 1967).

Tasa de asimilación neta (TAN):

$$TAN = \frac{\text{masa seca final} - \text{masa seca inicial}}{\text{tiempo final} - \text{tiempo inicial}} \times \frac{\ln \text{area foliar final} - \ln \text{area foliar inicial}}{\text{área foliar final} - \text{área foliar inicial}}$$

(Radford, 1967).

- **Objetivo 2.** Determinar las curvas de absorción de macronutrientes en interacción con silicio.

Los muestreos para la determinación de las curvas de absorción de nutrientes se realizaron posterior al corte de uniformización (90 días después de la siembra) del pasto, los intervalos para los muestreos a partir de dicho corte fueron: 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización, muestreos que corresponden a la etapa vegetativa del cultivo, donde se determinó la concentración de nitrógeno, fósforo, potasio y silicio. Las determinaciones se hicieron siguiendo las metodologías usadas por el laboratorio de bromatología y abonos orgánicos de la Universidad de Nariño (Tabla 4).

Tabla 4.

Metodología utilizada para determinación de NPK y Si de tejido vegetal.

Elementos	Método
Nitrógeno	Método Kjeldahl, valoración titulométrica.
Fósforo	Digestión vía húmeda, valoración espectrofotometría UV Vis.
Potasio	Digestión vía húmeda, valoración con espectrofotometría de absorción atómica.
Silicio	Digestión vía húmeda, determinación por peso.

Fuente. Este estudio

- **Objetivo 3.** Evaluar los Índices de Coeficiente de Utilización Biológica (CUB), Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN) y Coeficiente de Uso de Agua (CUA).

La determinación de los índices de Coeficiente de Utilización de Biológica (CUB) y Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN) se realizó con los niveles de concentración de los nutrientes nitrógeno, fósforo y potasio a nivel foliar al momento de la cosecha/corte del forraje.

Coeficiente de Utilización Biológica (CUB):

$$CUB = \frac{\text{Peso producido de forraje seco (kg)}}{\text{Concentración de nutrientes absorbidos a nivel foliar (kg)}}$$

(Santos et al., 2008; Grahmann et al., 2013 y CIMMYT, 2015).

Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN):

$$EUN = \frac{\text{Elemento Nutricional absorbido por forraje seco (kg)}}{\text{Total Nutrientes aportados (kg)}}$$

(Grahmann, et al. 2013 & CIMMYT, 2015).

Eficiencia de Uso de Agua (EUA): Se calculó a partir de expresar el peso de forraje seco producida en kilogramos producida por la precipitación efectiva durante cada periodo de evaluación (Medrano, 2007). La precipitación efectiva se calculó partiendo de los datos aportados por la estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 ubicada en el lugar de experimentación obviando los días donde la precipitación fue menor a 3 mm como lo plantea la FAO.

$$EUA = \frac{\text{Peso producido de forraje seco (kg)}}{\text{Precipitación efectiva (kg)}}$$

- **Objetivo 4.** Realizar análisis económico de la dosificación de silicio en interacción con la dosificación de NPK y la producción de forraje verde.

Análisis económico. El análisis económico se realizará por el método de indicadores de efectividad económica: costo, beneficio y rentabilidad, propuesto por Polimeni (2000).

4. Resultados y discusión

Los resultados de la investigación se presentan a continuación de acuerdo con cada uno de los objetivos propuestos en el proyecto y enunciados en el capítulo de metodología descrito en el presente documento, en ese sentido la figura 2 y las tablas que a continuación se presentan son los datos consolidados tanto de la precipitación, así como los resultados estadísticos, presentados a través de los cuadrados medios y las diferencias estadísticas en cada variable evaluada.

La evaluación de las variables planteadas en el proyecto se realizó después del corte de uniformización (90 días después de la siembra), el intervalo de cosecha entre cada corte (mayo, julio y agosto) fue de 40 días, todas las evaluaciones se desarrollaron en la fase vegetativa del cultivo. La información climática correspondiente a temperatura y precipitación, recopilada con la estación meteorológica se presenta en la figura 2.

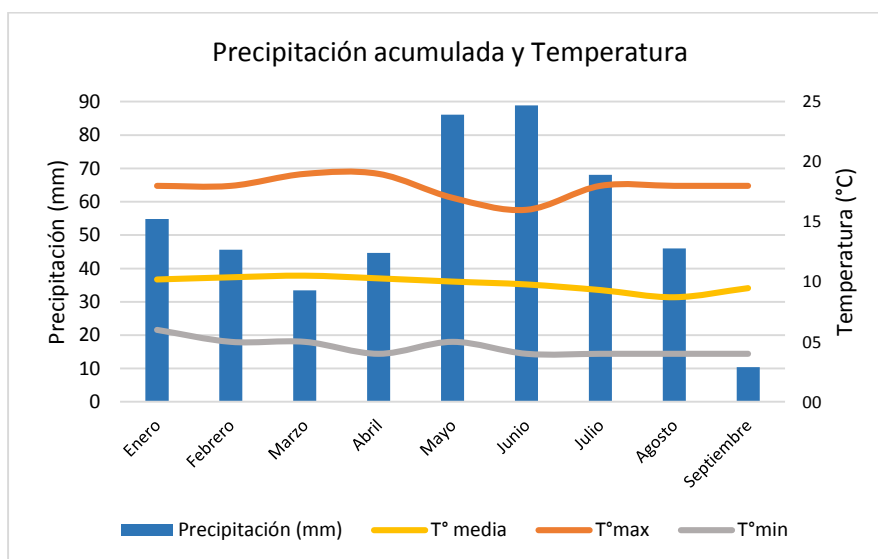


Figura 2. Precipitación acumulada y temperatura media de enero a septiembre de 2020

Fuente. Este estudio

4.1 Resultados para producción de forraje verde (PFV), producción de materia seca (PMS), altura de planta (AP) e índice de área foliar (IAF).

Tabla 5.

Cuadrados medios para las variables PFV, PMS, AP e IAF en los cortes de mayo, julio y agosto.

Primer corte - (mayo 25)					
F. Variación	gl	PFV	PMS	AP	IAF
Modelo	20	143.83	1.98	67.77	1.04
Bloque	3	325.76	4.67	133.62	2.18
NPK	2	486.68*	5.77	176.1*	3.71**
Error a	6	83.68	1.24	26.89	0.33
Si	3	64.58**	1**	25.49	0.77
NPK*Si	6	38.36*	0.59*	60.77*	0.41
Error b	27	13.62	0.2	23.21	0.71
R ²		0.89	0.88	0.68	0.52
CV		10.27	10.66	6.17	33.5
Segundo corte - (julio 4)					
F. Variación	gl	PFV	PMS	AP	IAF
Modelo	20	57.08	1.04	63.84	0.57
Bloque	3	7.42	0.18	28	1.76
NPK	2	221.86*	4.01**	217.03	0.99
Error a	6	21.86	0.31	94.96	0.38
Si	3	63.62**	1.45**	30.11	0.2
NPK*Si	6	58.91**	1**	16.45	0.22
Error b	27	13.64	0.25	27.48	0.29
R ²		0.76	0.76	0.63	0.59
CV		13.93	14.74	6.66	26.62
Tercer corte - (agosto 13)					
F. Variación	gl	PFV	PMS	AP	IAF
Modelo	20	33.06	1	100.25	0.16
Bloque	3	2.54	0.13	27.94	0.51
NPK	2	185.71*	5.54*	367.83	0.26
Error a	6	30.76	0.95	111.56	0.1
Si	3	19.38	0.6	138.71*	0.05
NPK*Si	6	6.56	0.17	16.67	0.06
Error b	27	7.98	0.25	20.9	0.07
R ²		0.75	0.75	0.78	0.61
CV		23.78	23.36	7.76	22.91

* = Diferencias estadísticas

Fuente. Este estudio

4.2 Producción de forraje verde (PFV), materia seca (PMS) y altura de planta (AP)

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas para la interacción de los factores en los cortes de mayo y julio para las variables de PFV, PMS y AP. De este modo, la gráfica de interacción para PFV (figura 3) muestra que los mejores rendimientos en el corte de mayo se presentan cuando el nivel de NPK es de 381-156-89 kg ha⁻¹ (línea punteada + cuadros) en interacción con 75 kg ha⁻¹ de Si con una media 44.67 t ha⁻¹ y en el corte de julio el mejor rendimiento se presentó con 381-156-89 (línea punteada + cuadros) kg ha⁻¹ en interacción con 50 kg ha⁻¹ con una media de 34.58 t ha⁻¹. Así mismo, la gráfica de interacción para PMS (figura 4) muestra que los rendimientos más altos se presentaron cuando el nivel de NPK fue de 381-156-89 kg ha⁻¹ (línea punteada + cuadros) en interacción con 75 kg ha⁻¹ de Si en los cortes de mayo y julio con una media de 5.38 y 4.54 t ha⁻¹, respectivamente. Finalmente, la gráfica de interacción para AP (figura 5) en el corte de mayo muestra que los mejores resultados se encontraron cuando el nivel de NPK fue de 381-156-89 kg ha⁻¹ (línea punteada + cuadros) en interacción con 50 y 100 kg ha⁻¹ de Si con unas medias de 84.03 cm y 82.71 cm, respectivamente, y el nivel de NPK 286-117-67 kg ha⁻¹ (línea punteada + triángulos) en interacción con 100 kg ha⁻¹ de Si presentó una media de 84.22 cm.

Los resultados hallados sugieren que el nivel de fertilización basado en el análisis de suelo correspondiente a 381-156-89 kg ha⁻¹ en interacción con 75 kg ha⁻¹, permiten expresar el potencial genético del pasto ryegrass aubade en las condiciones del trópico alto, teniendo en cuenta que la ficha técnica (Saénz Fety, 2021) y estudios realizados por (Vargas- Martínez et al., 2018) reportan que la producción por corte de forraje verde puede oscilar entre 28 y 35 t ha⁻¹.

El hecho de encontrar estos resultados se deba, posiblemente, al sinergismo existente entre el Si y diferentes elementos que se encuentran en la solución del suelo. Como lo indican Huang y

colaboradores (1992, 1997), quienes sugieren que algunos de los efectos benéficos del Si sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos son indirectos y están relacionados con la mejora mediada por el Si en la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la absorción de nutrientes en las plantas, afirmando que el Si es promotor de la traslocación de 11 nutrientes incluidos N, P, K, Mg, Ca, Mn, Zn, Cu, Fe, Mo y B. Elementos los cuales están directamente relacionados con la productividad del pasto ryegrass teniendo en cuenta que este es un forraje exigente en N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn y B como lo afirma Guerrero (1998). Así mismo también se reporta el incremento en las concentraciones de N, P y K en las hojas como efecto de la aplicación de Si y su concentración en el suelo (Liang, 2015). Igualmente, Legarda y colaboradores (2015) en pasto ryegrass aubade reportan que niveles diferenciales de Si en interacción con niveles óptimos de NPK potencian la producción de forraje verde, producción de materia seca, altura de planta y concentración de P tisular. Por otra parte, estudios realizados en otros cultivos como el de White y colaboradores (2017), donde se evaluó la interacción de diferentes niveles de N y Si, se encontró que la aplicación de silicio potencia diferentes componentes de rendimiento en trigo tales como producción de grano, número de espigas, número de granos por espiga. Por otra parte, un estudio realizado por Prifti y Maçi (2017), reporta que la aplicación de Herbagreen (Calcita marina: CaO (35.9%) + SiO_2 (18.1%) + MgO (1.9%) + P_2O_5 (0.28%) + K_2O (0.1%) + S (0.52%)), puede reducir hasta en un 30% la aplicación de fertilizantes NPK, sin afectar la producción y calidad del grano de trigo y en estudios realizados en maíz Jawahar et al. (2017) reportan el incremento significativo en producción y calidad de grano cuando se realiza aplicación edáfica de ácido mono silícico granulado y foliar acompañado de una fertilización estándar de NPK.

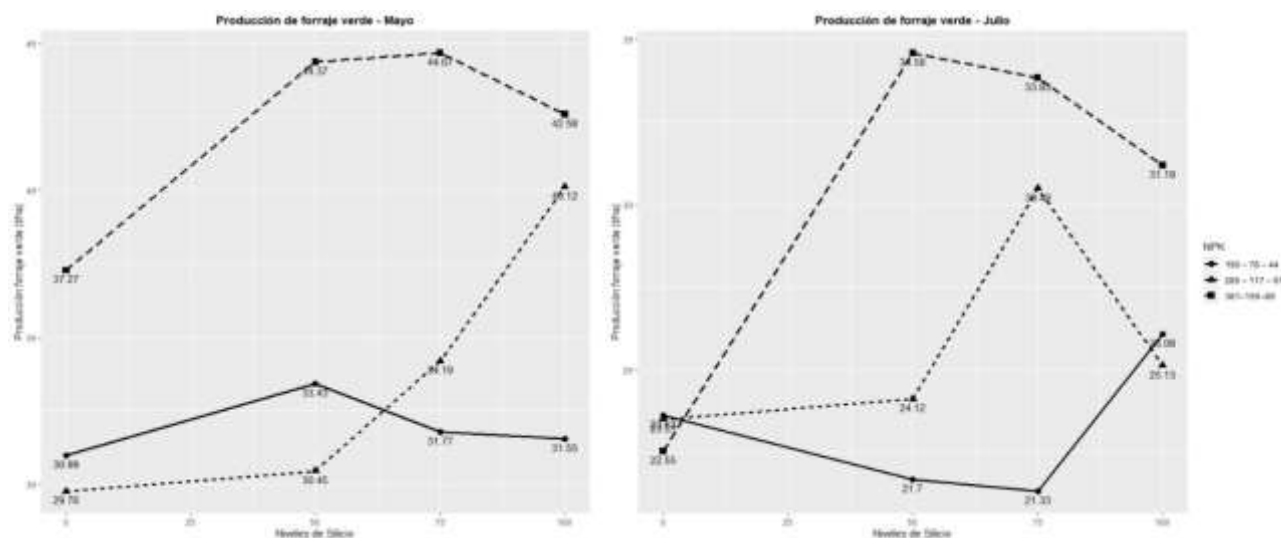


Figura 3. Grafica de interacción de factores para producción de forraje verde – PFV

Fuente. Este estudio

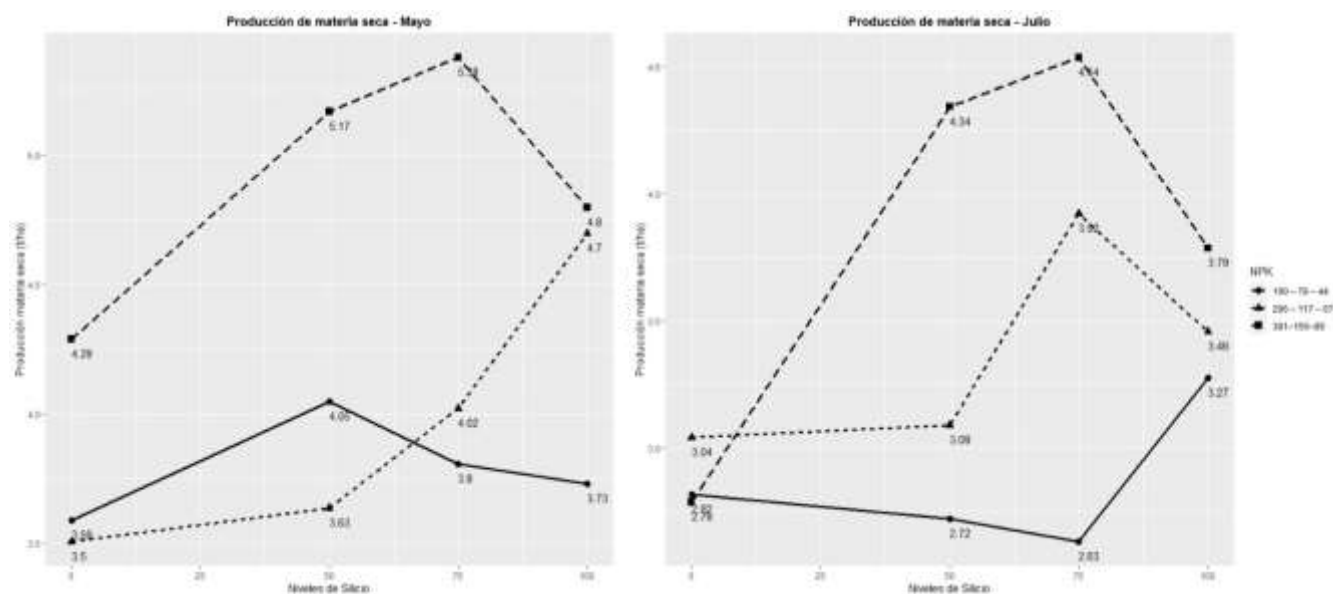


Figura 4. Grafica de interacción de factores para producción de materia seca – PMS

Fuente. Este estudio

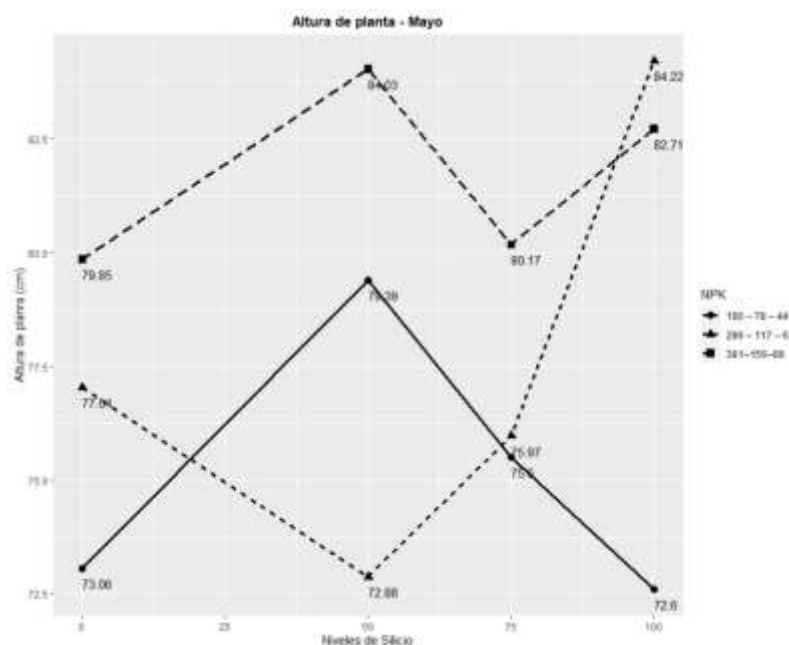


Figura 5. Grafica de interacción de factores para altura de planta – AP

Fuente. Este estudio

En cuanto al corte de agosto, el análisis de varianza muestra diferencias estadísticas solo para los niveles de NPK, indicando que un nivel de 381-156-89 de NPK destaca estadísticamente alcanzando una producción de forraje verde de 15.78 t ha^{-1} mientras que los niveles de NPK 286-117-67 y 190-78-44 resultaron ser iguales con una producción media de 10.34 t ha^{-1} y 9.51 t ha^{-1} , respectivamente. Igual situación se observó para la producción de materia seca donde el nivel de 381-156-89 NPK presentó una producción media de 2.81 t ha^{-1} , frente a 1.83 t ha^{-1} y 1.76 t ha^{-1} producidos por los niveles de NPK 286-117-67 y 190-78-44, respectivamente. Estos resultados muestran que el nivel de 381-156-89 kg ha^{-1} de NPK potencia el rendimiento del cultivo, esto se debe principalmente por el aumento de la fuente de nutrientes para satisfacer la relación drenaje – planta (Ferreira Novais et al., 2007), permitiendo estimular la reacción de estos elementos en la solución del suelo ayudando al mantenimiento de este recurso, ya que como afirma Ferreira Novais et al. (2007) el suelo puede ser naturalmente una fuente de nutrientes fértil o puede tornarse en

una fuente con menor o mayor restricción (tamponamiento) de nutrientes por medio de la aplicación de fertilizantes. De aquí que diversos autores afirman que la fertilización adecuada podría aumentar la fertilidad del suelo y asegurar la producción sostenible de cultivos (W. Gong et al., 2009; X. Y. Li et al., 2005; Manan et al., 2009).

4.3 Índice de Área Folia (IAF)

Los resultados (Tabla 5) muestran que existen diferencias estadísticas en el corte de mayo para los niveles de NPK, de este modo la comparación de medias mostró que el nivel de 381-156-89 kg ha⁻¹ presentó la media más alta con un valor de 3.0, seguido por los niveles de 286-117-67 kg ha⁻¹ y 190-78-44 kg ha⁻¹ de NPK con medias de 2.53 y 2.04, respectivamente (Anexo C).

El hecho de encontrar que el nivel 381-156-89 kg ha⁻¹ NPK presente en promedio el valor más alto para IAF, se debe posiblemente a la interacción de los tres elementos nitrógeno, fósforo y potasio, y su influencia en el aumento del área foliar principalmente del nitrógeno, de este modo, Lawlor (2002) reporta que el suministro oportuno y en cantidades adecuadas de N es crucial para el crecimiento de las hojas debido a la función de las proteínas de crecimiento de las paredes celulares y el citoesqueleto y por tanto la expansión de las células, optimizando el uso de la energía de la luz utilizada en la reducción de CO₂ y NO₃ y en la síntesis de asimilados que se utilizaran para el crecimiento vegetativo y reproductivo con un consecuente aumento en la producción.

4.4 Índices de crecimiento

La tabla de cuadrados medios para peso de planta y área foliar muestra que hay diferencias estadísticas para los niveles de NPK en los diferentes tiempos de muestreo, 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización (Tabla 6).

Tabla 6.

Cuadrados medios para peso de planta y área foliar a 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización.

F. Variación	gl	Peso de planta		
		15 días	30 días	40 días
Modelo	20	0.02	0.12	44.65
Bloque	3	0.01	0.01	45
NPK	2	0.12*	1**	220.76*
Error a	6	3.10E-03	0.02	23.44
Si	3	0.02	0.02	30.5
NPK*Si	6	0.02	0.04	14.08
Error b	27	0.02	0.07	21.47
R ²		0.41	0.56	0.61
CV		33.18	25.9	38.57

F. Variación	gl	Área foliar		
		15 días	30 días	40 días
Modelo	20	992.46	3264.46	14295.94
Bloque	3	1206.9	6415	30145.32
NPK	2	5550.53*	11412.08*	51109.34*
Error a	6	555.87	877.8	4494.84
Si	3	218.07	998.69	10665.95
NPK*Si	6	189.66	2492.87	5716.22
Error b	27	577.08	2581.44	9850.94
R ²		0.56	0.48	0.52
CV		35.91	30.2	33.48

* = Diferencias estadísticas

Fuente. Este estudio

La prueba de comparación de medias mostró las diferencias estadísticas a los 15 días después del corte de uniformización entre los niveles de NPK, las plantas presentaron un peso en promedio

de 0.53 g, 0.46 g y 0.36 g para los niveles de 381-156-89, 286-117-67 y 190-78-44 kg ha⁻¹ de NPK, respectivamente. A los 30 días los niveles de NPK de 381-156-89 y 286-117-67 kg ha⁻¹ (Anexo D) fueron iguales presentando medias de 1.19 g y 1.16 g, respectivamente, diferentes al nivel de NPK de 190-78-44 kg ha⁻¹ que presentó una media de 0.74 g. Finalmente, a los 40 días se presenta un contraste marcado para el nivel de 381-156-89 con una media de 15.65 g, versus el nivel de 190-78-44 kg ha⁻¹ con una media de 8.22 g (Tabla 10). El aumento de masa seca a través del tiempo presentó un comportamiento exponencial como se muestra en la figura 6.

Por otra parte, en cuanto al área foliar los niveles de 381-156-89 y 286-117-67 kg ha⁻¹ fueron iguales a los 15 días después del corte de uniformización, presentando medias de 77.72 y 77.57 cm²/planta, respectivamente, versus 45.39 cm²/planta presentando por el nivel de 190-78-44 kg ha⁻¹. Igual comportamiento pasó a los 30 días donde los niveles de 381-156-89 y 286-117-67 kg ha⁻¹ presentaron medias de 190.56 y 175.47 cm²/planta, diferentes a el nivel de 190-78-44 kg ha⁻¹ que presentó una 138.64 cm²/planta. Finalmente, a los 40 días la diferencia marcada se muestra entre el nivel de 381-156-89 y 190-78-44 kg ha⁻¹ con unas medias de 352.47 y 239.45 cm²/planta, respectivamente. El incremento del área foliar también presentó un crecimiento exponencial como se muestra en la figura 7.

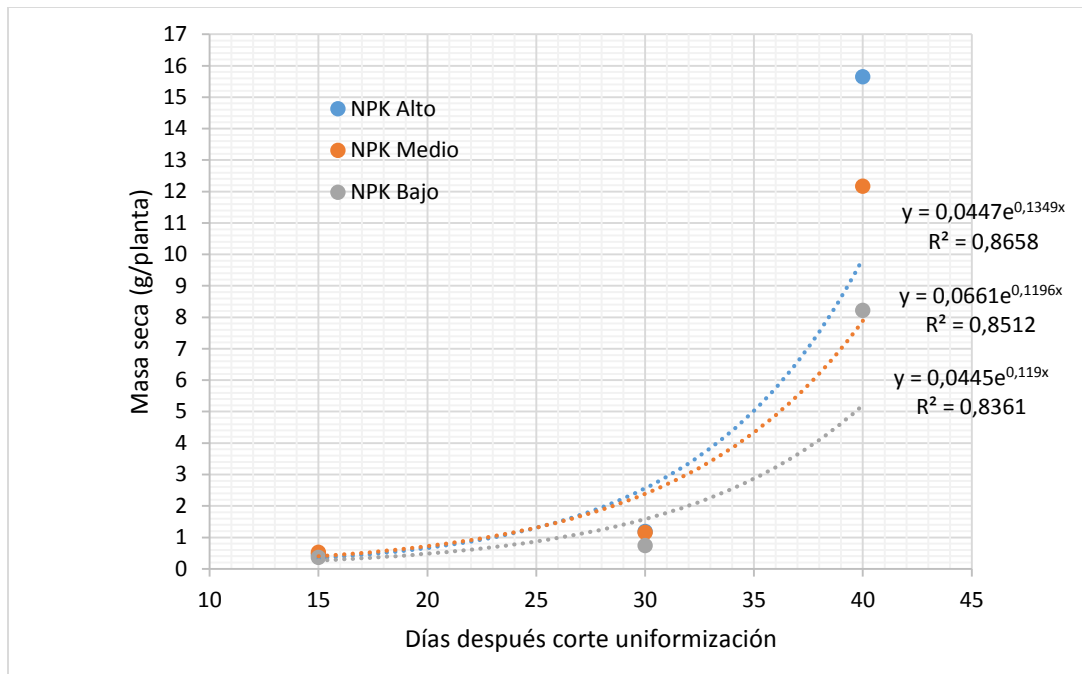


Figura 6. Incremento de masa seca a través del tiempo después del corte de uniformización

Fuente. Este estudio

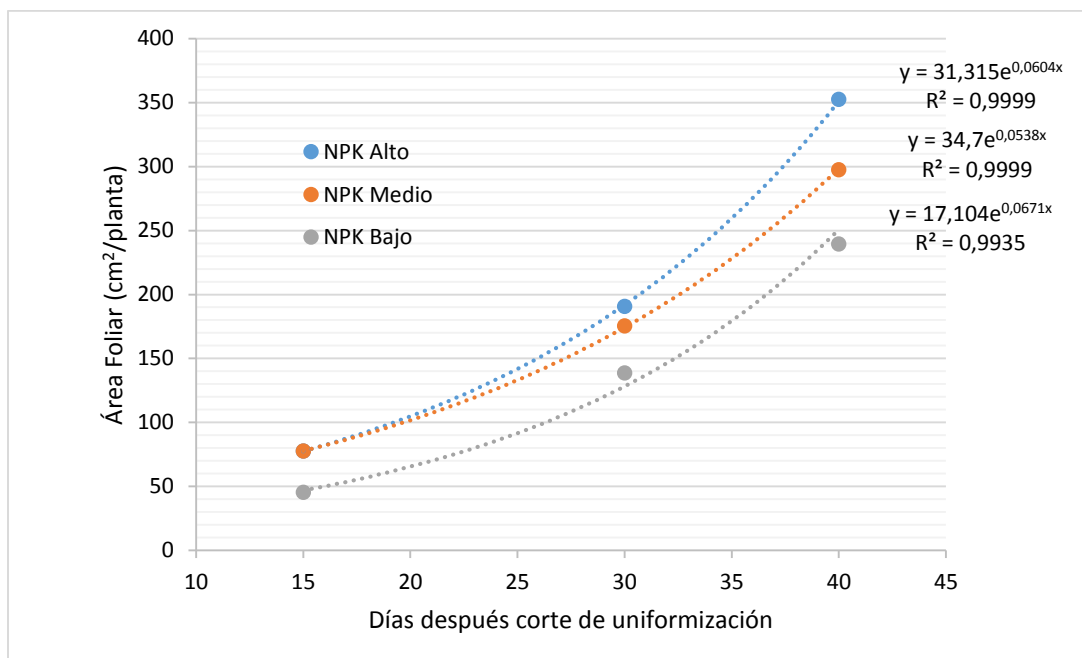


Figura 7. Incremento del área foliar a través del tiempo después del corte de uniformización.

Fuente. Este estudio

4.5 Índices fisiológicos Tasa de Crecimiento Acumulada (TCA), Tasa de Crecimiento Relativa (TCR) y Tasa de Acumulación Neta (TAN).

Teniendo en cuenta los resultados anteriores (incremento de área foliar y materia seca) se calculó los índices de crecimiento mediante las TCA, que mide el incremento de la masa seca por unidad de tiempo (g día^{-1}), la TCR; que expresa el incremento de masa en un intervalo de tiempo con relación al peso inicial ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$) y la TAN; que mide la acumulación de masa seca en función del área foliar por unidad de tiempo (Rincon et al., 2007).

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas para estos índices en los niveles de NPK (Tabla 11), indicando que el ryegrass aubade con niveles de NPK de 381-156-89 y 286-117-67 kg ha^{-1} presenta una TCA de 0.05 y 0.04 g día^{-1} a los 30 días después del corte de uniformización, presentando diferencias con el nivel de 190-78-44 kg ha^{-1} el cual exhibe un aumento de 0.03 g día^{-1} , el mayor valor de TCA se obtuvo a los 40 días donde se presentaron medias de 1.45, 1.1 y 0.75 g día^{-1} , para los niveles de 381-156-89, 286-117-67 y 190-78-44 kg ha^{-1} , respectivamente (Anexo E, Figura 5).

El comportamiento y la tendencia de la TCR fueron similares a la TCA, incrementando para los niveles 381-156-89 y 286-117-67 kg ha^{-1} , entre los 15 y 30 días después del corte de uniformización 0.06 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$, diferente al nivel 190-78-44 kg ha^{-1} que presentó una media de 0.05 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$. En el intervalo de los 30 a 40 días los valores para TCR fueron 0.26, 0.23 y 0.22 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$, para los niveles 381-156-89, 286-117-67 y 190-78-44 kg ha^{-1} , respectivamente (Anexo E, Figura 6)

La TAN como indicador de la eficiencia fotosintética, mostró que el nivel 381-156-89 kg ha^{-1} presentó el mayor valor a los 40 días con 0.01 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$, seguido por los niveles de 286-117-67

y 190-78-44 kg ha⁻¹ con medias de 0.0049 y 0.0039 g·m⁻²·día⁻¹, respectivamente (Tabla 7, Figura 7).

Tabla 7.

Cuadrados medios índices de crecimiento TCA, TCR y TAN

F. Variación	gl	TCA	
		30 días	30 - 40 días
Modelo	20	0.00038	0.42
Bloque	3	0.000085	0.44
NPK	2	0.0021*	1.96*
NPK*Bloque	6	0.000073	0.23
Si	3	0.00018	0.31
NPK*Si	6	0.00037	0.15
Error	27	0.00036	0.21
R ²		0.44	0.59
CV		49.41	42.14
F. Variación	gl	TCR	
		15 - 30 días	30 - 40 días
Modelo	20	0.00045	0.0043
Bloque	3	0.00043	0.01
NPK	2	0.00056*	0.01
NPK*Bloque	6	0.000061	0.01
Si	3	0.00038	0.0016
NPK*Si	6	0.00087	0.0016
Error	27	0.00041	0.0018
R ²		0.45	0.66
CV		36.9	18.24
F. Variación	gl	TAN	
		15 - 30 días	30 - 40 días
Modelo	20	1.90E-08	6.00E-06
Bloque	3	1.70E-08	2.40E-06
NPK	2	0.000000031*	1.40E-05
NPK*Bloque	6	3.40E-09	9.10E-06
Si	3	1.10E-08	4.90E-06
NPK*Si	6	3.70E-08	2.30E-06
Error	27	2.10E-08	3.00E-06
R ²		0.4	0.59
CV		40.59	36.99

* = Diferencias estadísticas

Fuente. Este estudio

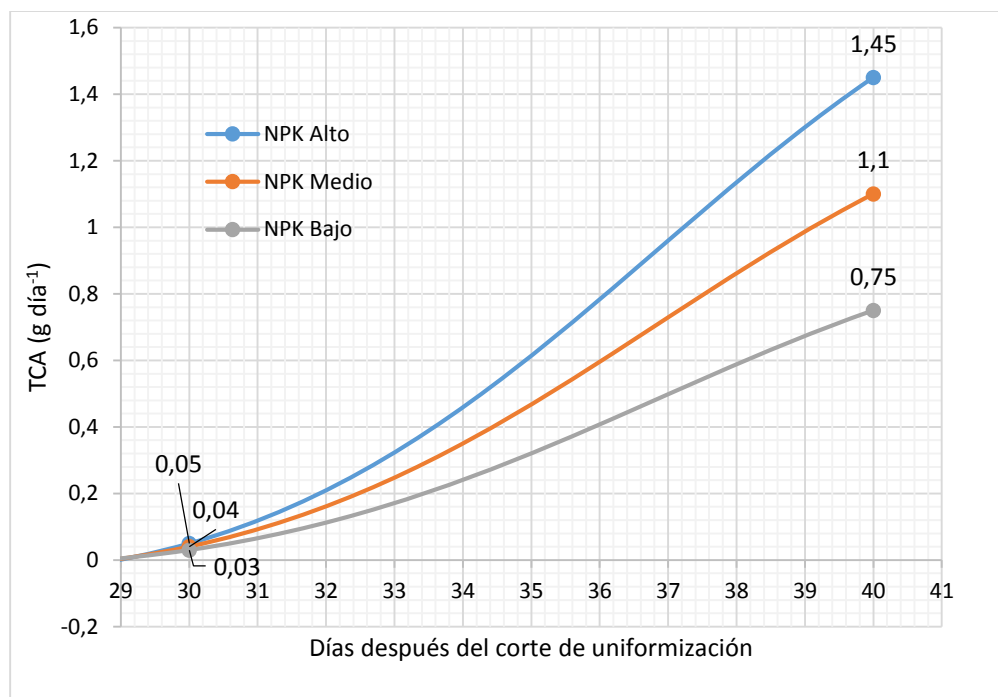


Figura 8. Tasa de Crecimiento Absoluta (TCA) para diferentes niveles de NPK

Fuente. Este estudio

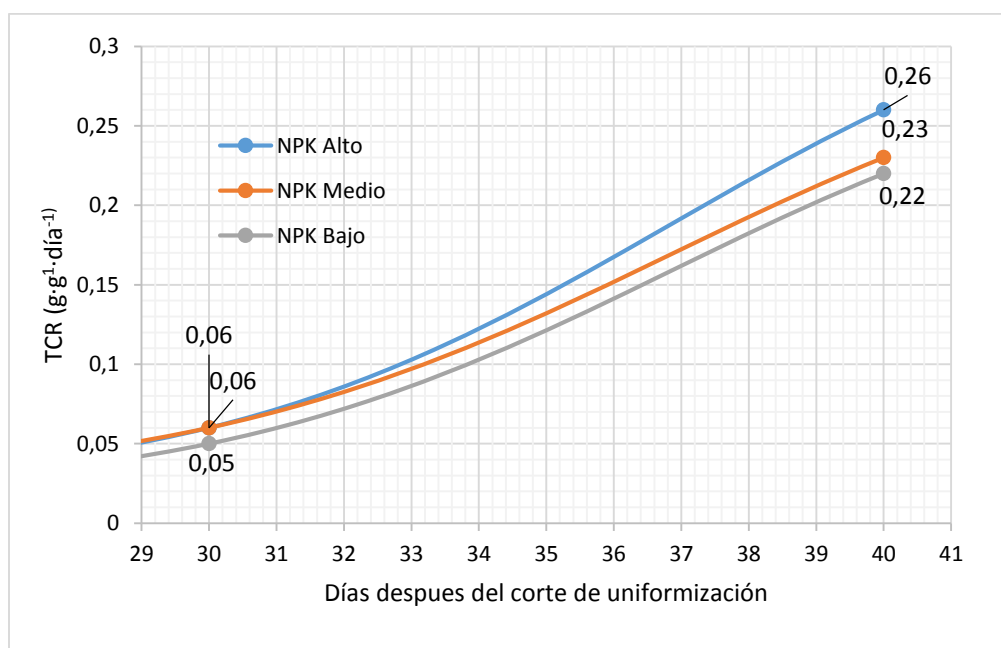


Figura 9. Tasa de Crecimiento Absoluta (TCR) para diferentes niveles de NPK

Fuente. Este estudio

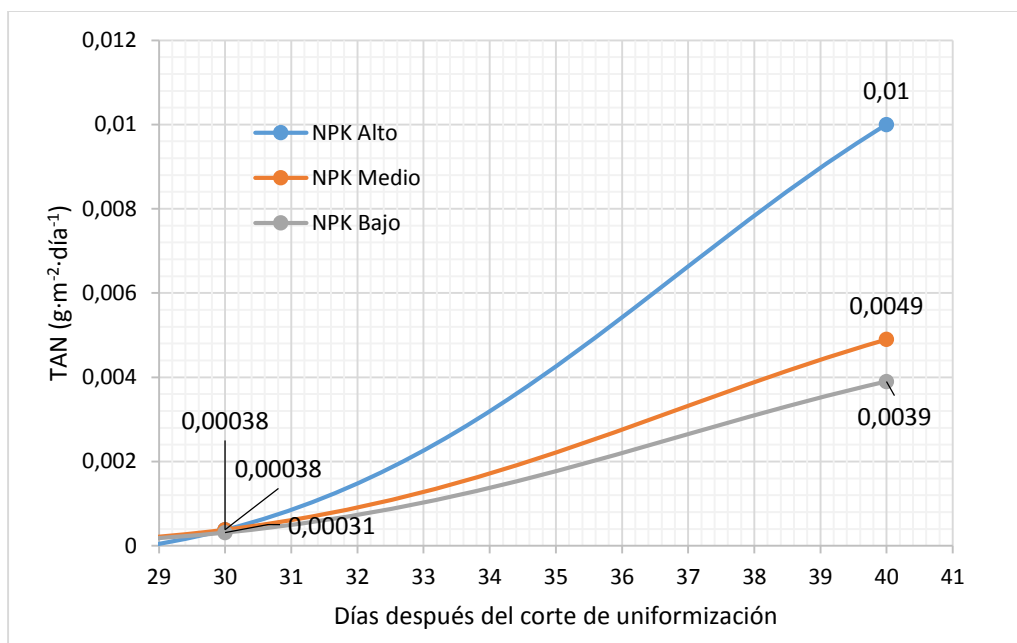


Figura 10. Tasa de Asimilación Neta (TAN) para diferentes niveles de NPK

Fuente. Este estudio

Las diferencias estadísticas encontradas para estos índices fisiológicos solamente para los niveles de NPK, se debe posiblemente a que estos índices se centran específicamente en la fisiología del cultivo, es decir, el resultado depende en gran mayoría por los elementos nutricionales que están directamente involucrados en los procesos fisiológicos de las plantas, en este sentido la fertilización nitrogenada aumenta la concentración de la clorofila, lo que a su vez se ve reflejado en una mayor capacidad para la síntesis de foto-asimilados (Rincón, 2012). Por otra parte, la fertilización fosfatada desempeña un importante papel metabólico en la respiración y fotosíntesis (fosforilación), en el almacenamiento y la transferencia de energía (NAD, NADP y ATP) y en la división y crecimiento celular. El P se acumula en partes de la panta en crecimiento y en las semillas. Es determinante para el desarrollo de las raíces y de los tejidos meristemáticos, por lo cual es importante durante el desarrollo vegetativo de los pastos (Bernal & Espinosa, 2003). Y la fertilización con K es vital en la fotosíntesis y en la activación de más de 60 sistemas

enzimáticos en las plantas, pero no está involucrado directamente en la estructura de las células. Es muy importante para mantener la presión osmótica y para neutralizar cargas eléctricas dentro de la célula. Su alta movilidad permite que se traslade rápidamente de célula a célula, de tejido viejo a tejido nuevo en desarrollo, o a los órganos de almacenamiento (Bernal & Espinosa, 2003). En este orden de ideas y entendiendo la participación de los nutrientes NPK en la fisiología de los cultivos, autores como Chen, (2006) y Derkowska et al., (2015) afirman que la fertilización puede tener un gran impacto en el crecimiento de las plantas, influyendo directamente en las TCA y TCR. Estudios realizados en ryegrass aubade por Sierra-Alarcón et al. (2019) reportan el incremento de 7.8 y 8.9 kg de materia seca por kilogramo de nitrógeno aplicado y Mazza et al. (2012), reportan incrementos de materia seca que varían entre 1 y 4 kg por kg de P_2O_5 aplicado. En este sentido, Jayanthi et al. (2002) señalan que la aplicación de fertilizantes aumenta el número de macollas en un estado inicial del cultivo incrementando la productividad de los forrajes, afirmación que se asocia con esta investigación teniendo en cuenta que existieron diferencias estadísticas para TCA y TCR a los 30 días después del corte de uniformización y es hasta este punto donde se da la mayor ganancia de materia seca, esto posiblemente a que la fertilización con los niveles de 381-156-89 y 286-117-67 kg ha⁻¹ influyen de una manera más eficiente en la formación de macollas, lo que a su vez está directamente relacionado con la formación de una mayor cantidad de forraje. Sin embargo, los niveles de fertilización variables no son los únicos responsables en el comportamiento de la TCA y TCR ya que como lo afirma Shipley (2006) pueden influir diferentes factores internos, como la etapa de desarrollo de la planta y factores externos tanto bióticos como abióticos.

Con respecto a la TAN, Hunt et al. (2002) afirman que esta variable depende directamente del área foliar y de la disposición y la edad de las hojas, así como el metabolismo interno de la planta y su respuesta a factores externos mediante la actividad respiratoria. Además, Lopes et al. (2011)

señala que la fertilización nitrogenada en forrajes está directamente relacionada con la TAN teniendo en cuenta que esta práctica está directamente involucrada con el mayor desarrollo de tejido foliar. Resultados similares son reportados por Torres-Moya et al. (2016) en el cultivo de avena quien reporta que el incremento de IAF, TCA, TCR y TAN está estrechamente relacionado con el incremento de niveles de fertilización tanto orgánica como orgánica.

El análisis estadístico para los índices de crecimiento mostró que el coeficiente de correlación es bajo (entre 40 y 50%) y además el coeficiente de variación es alto (entre 30 y 50%), esto lleva que se debe reconsiderar la metodología implementada en el muestreo, teniendo en cuenta que la densidad de plantas por unidad experimental es considerablemente alta con respecto al número de plantas que se utilizaron para la evaluación.

Objetivo 2. Determinar las curvas de absorción de nutrientes del pasto ryegrass aubade (*Lolium* sp.).

4.6 Curvas de absorción de nutrientes

Los muestreos para las curvas de absorción se realizaron 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización, es decir, desde el momento de la fertilización del cultivo hasta este punto pasó un periodo de 90 días, tiempo en el cual se pudo observar el efecto de la fertilización en el comportamiento del cultivo.

El análisis de varianza se realizó para los diferentes tiempos de muestreo 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización (DDU). La tabla 8 correspondiente a los cuadrados medios muestra que a los 15 y 40 DDU existe diferencias estadísticas para la interacción de los niveles de NPK y Si, a diferencia de los 30 DDU donde se presenta diferencias estadísticas para los niveles de NPK.

Tabla 8.

Cuadrados medios para curvas de absorción de nutrientes NPK

F. Variación	gl	Nitrógeno (g/planta)		
		15 días	30 días	40 días
Modelo	17	7,2E-05	2,4E-04	0,06
Bloque	2	2,8E-06	7,8E-05	3,2E-03
NPK	2	2,9E-04*	1,4E-03*	0,25*
Error a	4	1,5E-05	4,0E-05	0,01
Si	3	8,1E-05*	6,7E-05	0,09*
NPK*Si	6	5,6E-05*	1,3E-04	0,04*
Error b	18	1,5E-05	1,0E-04	4,0E-03
R ²	35	0,82	0,69	0,94
CV		24,74	23,79	13,81

F. Variación	gl	Fósforo (mg/planta)		
		15 días	30 días	40 días
Modelo	17	0,66	1,36	346,17
Bloque	2	0,10	0,29	193,27
NPK	2	2,47*	6,87*	1079,49*
Error a	4	0,12	0,49	41,11
Si	3	0,58*	0,21	348,60*
NPK*Si	6	0,64*	1,04	354,84*
Error b	18	0,11	0,45	38,75
R ²		0,85	0,74	0,89
CV		20,41	20,72	18,52

F. Variación	gl	Potasio (g/planta)		
		15 días	30 días	40 días
Modelo	17	3,4E-04	1,5E-03	0,22
Bloque	2	5,3E-05	1,1E-03	0,02
NPK	2	1,2E-03*	0,01*	1,00*
Error a	4	1,0E-04	4,7E-04	0,04
Si	3	2,9E-04*	7,0E-05	0,20*
NPK*Si	6	3,4E-04*	8,9E-04	0,17*
Error b	18	1,6E-05	4,9E-04	0,02
R ²		0,95	0,74	0,90
CV		11,52	23,88	16,04

* = Diferencias estadísticas

Fuente. Este estudio

Las gráficas de interacción de los factores muestran que los niveles de absorción más altos de nitrógeno, fósforo y potasio a los 40 DDU se presentaron cuando el nivel de NPK 381-156-89 kg ha⁻¹ (línea punteada + cuadros) estuvo en interacción de 75 kg ha⁻¹ de Si presentando una media de 0.85 g planta⁻¹ (figura 11), 66.85 mg planta⁻¹ (figura 12) y 1.67 g planta⁻¹ (figura 13), para nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente. (Anexo F).

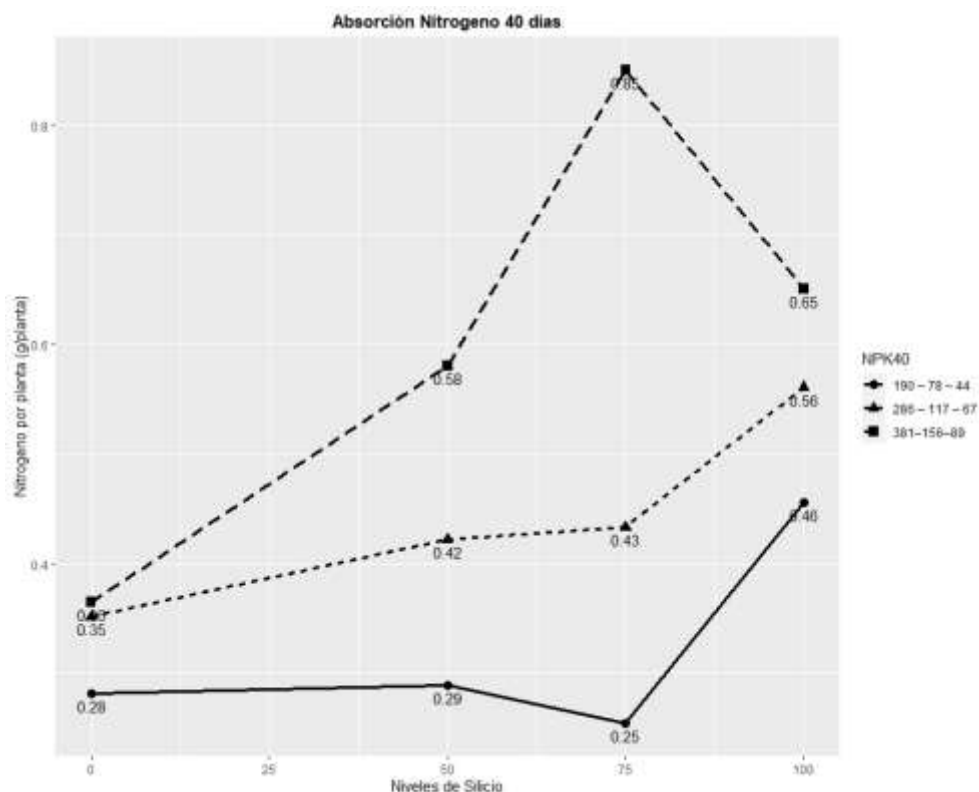


Figura 11. Grafica de interacción de factores, absorción de nitrógeno 40 DDU

Fuente. Este estudio

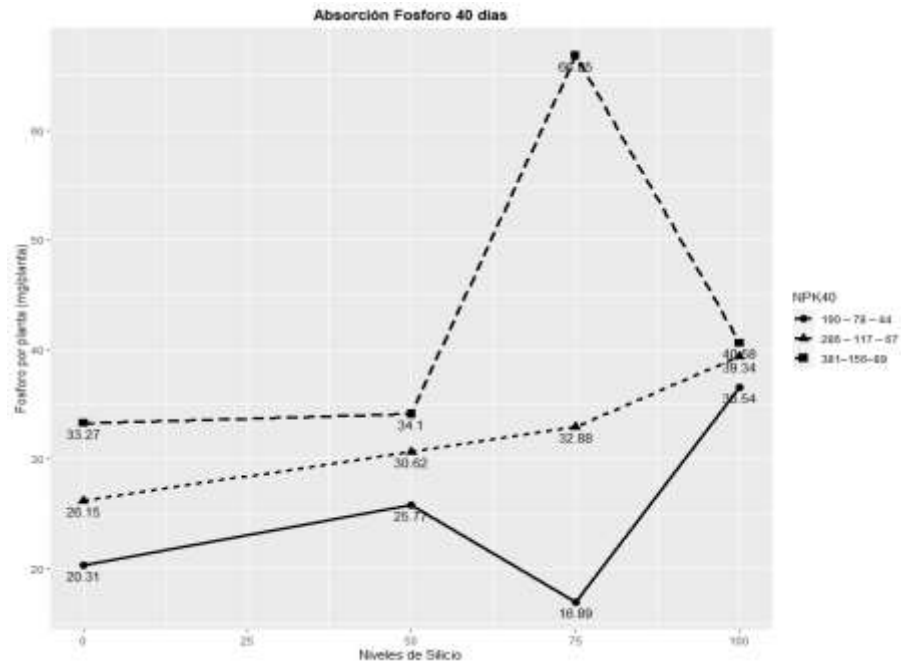


Figura 12. Grafica de interacción de factores, absorción de fósforo 40 DDU

Fuente. Este estudio

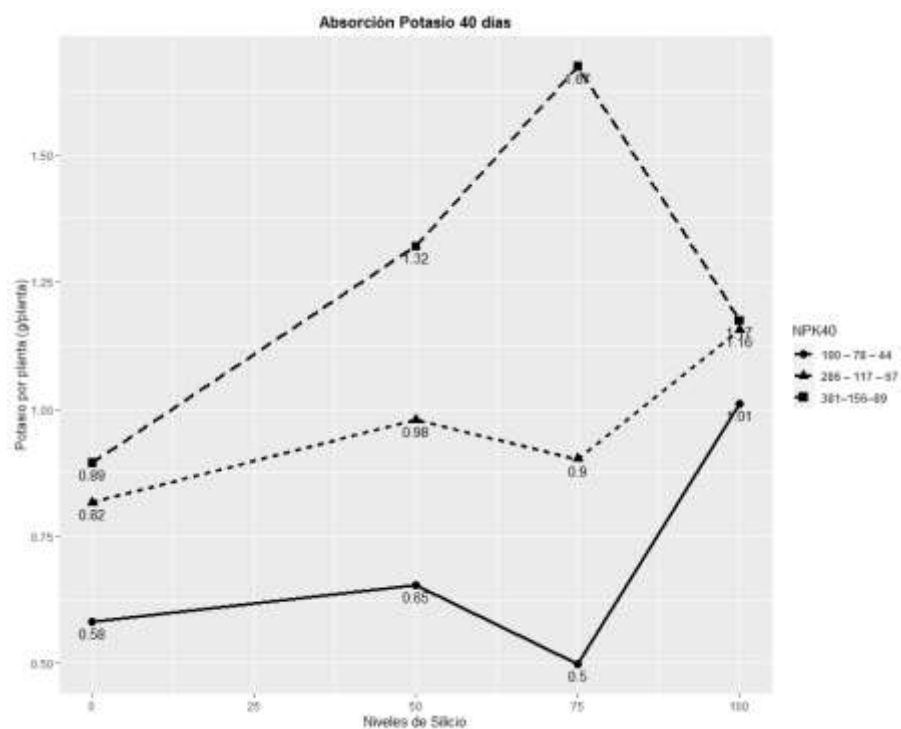


Figura 13. Grafica de interacción de factores, absorción de potasio 40 DDU

Fuente. Este estudio

A continuación, se registra la representación gráfica de las curvas de absorción para nitrógeno (Figura 14), fósforo (Figura 15) y potasio (Figura 16). Las gráficas muestran un comportamiento similar en la absorción de los tres elementos nitrógeno, fósforo y potasio, es decir, la tasa de absorción más alta es a los 40 DDU, mostrando que la diferenciación para los diferentes tratamientos se presenta entre los 30 y 40 DDU. Los resultados permiten afirmar que las interacciones entre 381-156-89 kg ha⁻¹ y 286 – 117 – 67 kg ha⁻¹ de NPK y los niveles de 100 y 75 kg ha⁻¹ de silicio (figuras 14, 15 y 16) presentan valores más altos de absorción de NPK en comparación a los tratamientos con un nivel del 50% de Si o en ausencia de este, esto se debe posiblemente a lo reportado por Volker et al. (1985) y Komisarov y Panfilova (1987) quienes afirman que los nutrientes adsorbidos en la superficie de sílice permanecen disponibles para las plantas en la solución del suelo, por otra parte, Tokunaga, (1991) reporta que las pérdidas por lixiviación de K y otros nutrientes móviles (específicamente los nutrientes de la solución del suelo con carga positiva) del horizonte superficial del suelo se redujeron debido a una superficie de sílice. De igual forma, Eneji y colaboradores (2005) informaron que la fertilización con silicato de potasio y calcio en arena aumentó la concentración tisular de N y K en dos variedades de pastos *Chloris gayana* y *Sorghum sudanense*.

Así mismo, el hecho de encontrar una mayor absorción de fósforo (P) se debe a que la fertilización con silicio pudo haber aumentado la cantidad de silicio disuelto en la solución del suelo (H₄SiO₄), y la cantidad de silicio adsorbido en los fosfatos ligeramente solubles de Al, Ca, Fe y Mg fue seguida por la desorción del anión fosfato haciéndolo más disponible para el cultivo (Lindsay, 1979; Matichenkov & Ammosova, 1996). Trabajos realizados por Quero, (2006) y Name (2006) soportan lo anterior afirmando que el silicio puede aumentar la absorción de fósforo en las plantas en un rango 40 a 60%.

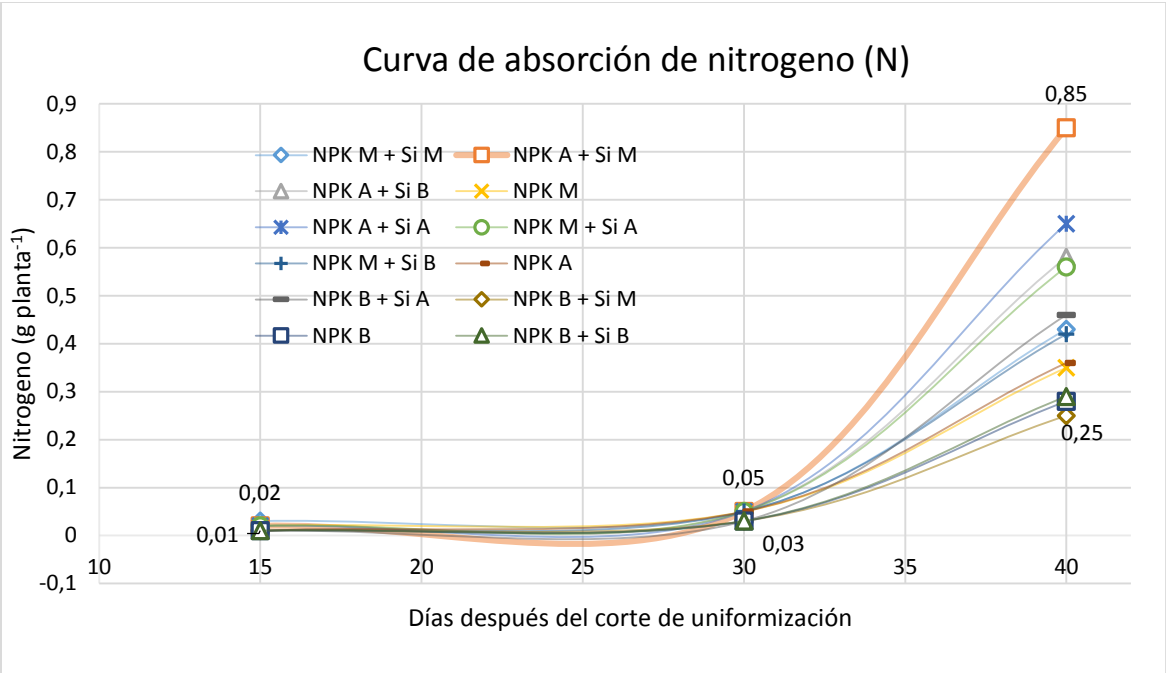


Figura 14. Curva de absorción nitrógeno

Fuente. Este estudio

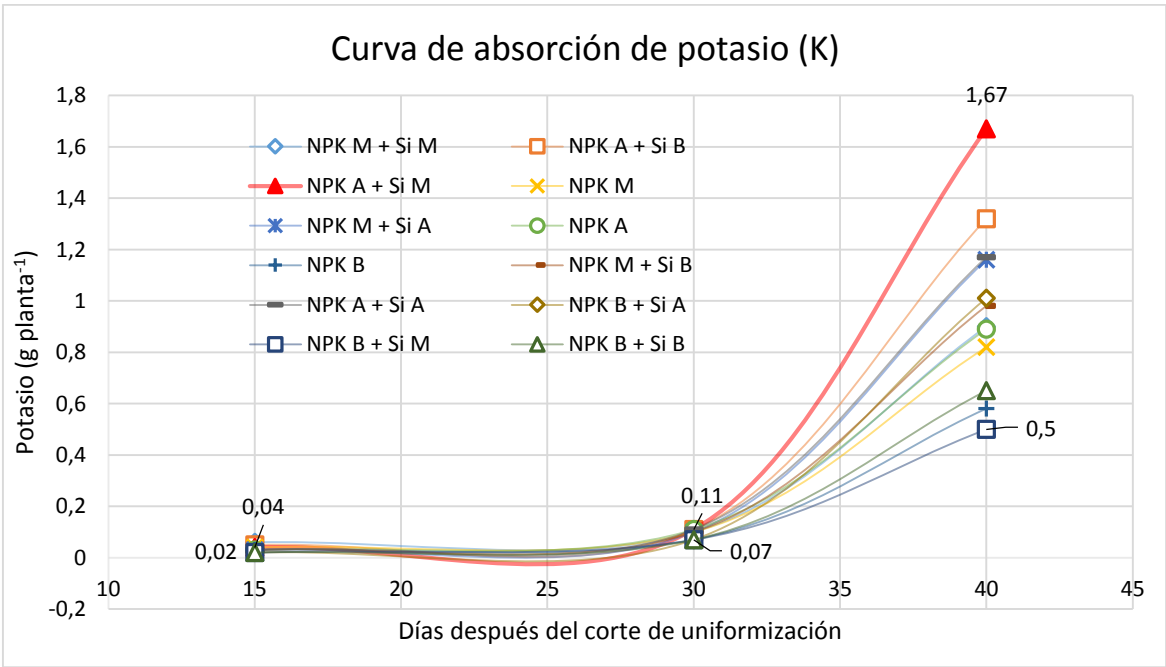


Figura 15. Curva de absorción fósforo

Fuente. Este estudio

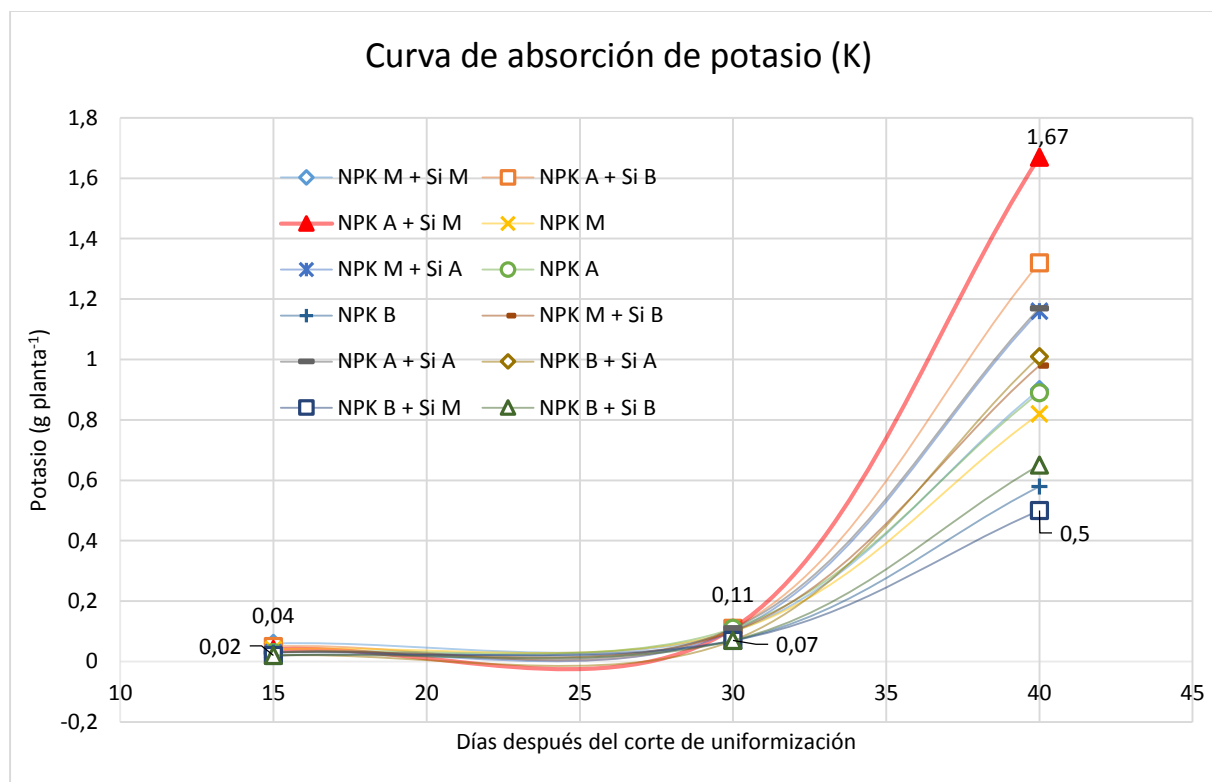


Figura 16. Curva de absorción de potasio

Fuente. Este estudio

4.7 Absorción de silicio

Anteriormente, se menciona que los niveles de absorción de NPK están siendo favorecidos por las cantidades diferenciales de Si aplicados en cada tratamiento, para respaldar dicha afirmación se realizó un análisis estadístico a las cantidades de Si tisulares, el análisis de varianza mostró que existen diferencias estadísticas para la interacción de los factores (Tabla 9), encontrando que la absorción de Si más alta con $0.25 \text{ g planta}^{-1}$ se presentó en interacción del nivel de NPK 381-156-89 67 kg ha^{-1} con 75 kg ha^{-1} de Si (Anexo G). Resultados similares encontraron Nascimento y colaboradores (2018), quienes reportan que la concentración de Si en las plantas fue mayor al tratamiento control sin silicio (0.7%) a cuando se realizó la aplicación de este de manera edáfica (1.6%) y foliar (1.7%). La respuesta positiva del ryegrass a la aplicación de Si puede explicarse por el hecho de que los forrajes son clasificados como acumuladores de Si (Liang et al., 2015). El

hecho de que haya absorción activa de silicio en este cultivo se debe a que posiblemente exista la presencia de los genes Lsi1 y Lsi2 que ya han sido reportados para cultivos como arroz, cebada y maíz en 2009 (Chiba et al., 2009; Mitani et al., 2009), estos son transportadores específicos de entrada (Lsi1) y salida (Lsi2) (Ma et al., 2006). De igual forma se puede hablar de una posible presencia del transportador Lsi6 que está involucrado en la distribución del Si a través de los tejidos de la parte aérea de la planta (Yamaji & Jian Feng, 2009). El Si juega un papel importante en el crecimiento de las plantas porque su deposición hace que las hojas sean más erectas y rígidas, favoreciendo una mayor interceptación de la luz y aumentando la eficiencia fotosintética (Marschner, 2012). El Si es necesario para el desarrollo normal del aparato fotosintético y la síntesis de clorofila (Isa et al., 2010). Además, los efectos beneficiosos del Si también pueden atribuirse a una mayor eficiencia en el uso del agua y la elongación de las células, lo que promueve el crecimiento de las plantas y el aumento de la biomasa (Hossain et al., 2002; Isa et al., 2010).

Tabla 9.

Cuadros medios absorción de silicio por planta (40 días después del corte de uniformización)

F. Variación	gl	Silicio
Modelo	17	0.01
Bloque	2	0.01
NPK	2	0.03*
Error a	4	1.60E-03
Si	3	0.01*
NPK*Si	6	0.01*
Error b	18	9.70E-04
R ²		0.88
CV		19.96

* = Diferencias estadísticas

Fuente. Este estudio

- **Objetivo 3.** Evaluar variables nutricionales del pasto ryegrass aubade (*Lolium* sp.), a través de los Índices de Coeficiente de Utilización Biológica (CUB), Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN) y Coeficiente de Uso de Agua (CUA).

4.8 Coeficiente de Utilización Biológica (CUB)

Tabla 10.

Cuadrados medios de los valores de Coeficiente de Utilización Biológica (CUB). Para los elementos nutricionales N, P y K en los diferentes cortes evaluados.

CUB - Corte mayo				
F. Variación	gl	N	P	K
Modelo	17	0.12	64.08	0.04
Bloque	2	0.17	252.98	0.10
NPK	2	0.24	82.20	0.06
Error a	4	0.24	20.38	0.06
Si	3	0.03	43.06*	0.03*
NPK*Si	6	0.36	34.73*	0.008
Error b	18	0.33	8.29	0.009
R ²		0.78	0.88	0.8
CV		13.77	15.6	15.91
CUB - Corte julio				
F. Variación	gl	N	P	K
Modelo	17	0.09	37.03	0.03
Bloque	2	0.008	35.20	0.01
NPK	2	0.21*	132.61*	0.14*
Error a	4	0.02	11.86	0.003
Si	3	0.16*	28.13	0.02
NPK*Si	6	0.08	27.02	0.02
Error b	18	0.04	13.50	0.02
R ²		0.64	0.72	0.59
CV		15.85	26.05	24.36
CUB - Corte agosto				
F. Variación	gl	N	P	K
Modelo	17	0.08	11.83	0.02
Bloque	2	0.08	1.64	0.003
NPK	2	0.25	22.86	0.09
Error a	4	0.11	8.37	0.01
Si	3	0.06	24.41	0.02
NPK*Si	6	0.03	7.57*	0.006
Error b	18	0.05	3.43	0.009
R ²		0.61	0.76	0.68
CV		24.72	26.5	25.54

* = Diferencias estadísticas

Fuente. Este estudio

En el corte de mayo los resultados muestran que los valores del CUB de P variaron entre 28.85 kg kg⁻¹ para el tratamiento de 381-156-89 kg ha⁻¹ de NPK en interacción con el nivel de 50 kg ha⁻¹ de Si y 15.14 g kg⁻¹ para el tratamiento con el nivel de 190-78-55 kg ha⁻¹ de NPK. Indicando que la fertilización con Si posiblemente está potenciando el uso biológico del P. Esto se debe posiblemente a la interacción entre Si y P, ya anteriormente mencionada. Por otra parte, teniendo en cuenta que para el CUB de K presentó diferencias estadísticas solamente para los niveles de Si, la prueba de comparación de medias mostró que el nivel de 75 kg ha⁻¹ de Si presentó la media más alta con 0.67 kg kg⁻¹ a diferencia de los tratamientos donde no se realizó la aplicación de Si que presentaron una media más baja con 0.53 kg kg⁻¹ (Anexo H).

En el corte de Julio, la variación de los valores de CUB estuvieron influenciados por los niveles de NPK para N, P y K y los niveles de Si para N (Tabla 10). Así, la prueba de comparación de medias muestra que el CUB de N presentó los valores más altos para los niveles de NPK 286-117-67 y 381-156-89 kg ha⁻¹ con unas medias de 1.48 y 1.46 kg kg⁻¹, respectivamente. Por otra parte, con respecto a los niveles de Si, se obtuvo que los niveles correspondientes a 50, 75 y 100 kg ha⁻¹ de Si presentaron las medias más altas con 1.50, 1.47 y 1.41 kg kg⁻¹, respectivamente, en comparación a los tratamientos donde no se realizó la aplicación de Si (0 kg ha⁻¹) que presentó la media más baja con 1.20 kg kg⁻¹. En cuanto a los valores de CUB de P, se obtuvo que el nivel de NPK de 186-117-67 kg ha⁻¹ presentó la media más alta con 17.67 kg kg⁻¹. En cuanto a los valores de CUB de K, se obtuvo que el nivel de 286-117-67 kg ha⁻¹ presentó el valor más alto 0.71 (Anexo H).

Finalmente, en corte de agosto, teniendo en cuenta que los valores de CUB de P responden a niveles diferenciales de Si la prueba de comparación de medias muestra que el nivel de Si correspondiente a 100 kg ha⁻¹ presentó una media 9.36 siendo diferente a los niveles de 75, 50 y 0

kg ha⁻¹, los cuales presentaron medias de 5.62, 6.77 y 6.22, respectivamente (Anexo H). El hecho de encontrar diferencias estadísticas para el CUB de P en el tercer corte se debe posiblemente a que una dosis más alta de Si puede tener más perdurabilidad y residualidad en el suelo que le permitan llevar a cabo las reacciones en el suelo, anteriormente mencionadas que le permitan liberar el P no lábil.

Los resultados encontrados concuerdan con lo afirmado por Trindade et al., (2001) quienes concluyen que las plantas son menos eficientes en la utilización de los nutrientes en ausencia de fertilizantes. Así mismo, De Luca et al., (2002) señalan que el incremento de biomasa está relacionado directamente con el coeficiente de uso biológico de los nutrientes, específicamente de P.

4.9 Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN)

Tabla 11.

Cuadrados medios de los valores de Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN) Para los elementos nutricionales N, P y K en los diferentes cortes evaluados.

F. Variación	EUN - Corte mayo			
	gl	N	P	K
Modelo	17	0.06	0.05	4.39
Bloque	2	0.14	0.02	7.78
NPK	2	0.24	0.26	20.31
Error a	4	0.04	0.05	3.22
Si	3	0.01*	0.01	1.16
NPK*Si	6	0.01	0.02	0.35
Error b	18	3.50E-03	0.01	0.47
R ²		0.94	0.88	0.9
CV		10.85	17.61	13.77

EUN - Corte julio				
F. Variación	gl	N	P	K
Modelo	17	0.01	0.02	1.11
Bloque	2	0.01	0.01	0.28
NPK	2	0.03*	0.10*	5.69*
Error a	4	1.90E-03	3.60E-03	0.03
Si	3	0.01*	0.01	0.90*
NPK*Si	6	4.50E-03	0.01	0.68
Error b	18	2.30E-03	0.01	0.28
R ²		0.78	0.73	0.79
CV		16.39	22.88	18.25
EUN - Corte agosto				
F. Variación	gl	N	P	K
Modelo	17	4.50E-03	0.02	0.93
Bloque	2	3.90E-04	0.01	0.98
NPK	2	0.02	0.13	4.45
Error a	4	4.90E-03	0.02	0.72
Si	3	3.30E-03	0.01	0.17
NPK*Si	6	2.00E-03	2.10E-03	0.25
Error b	18	1.80E-03	0.01	0.2
R ²		0.7	0.79	0.81
CV		24.42	26.46	23.9

* = Diferencias estadísticas

Fuente. Este estudio

En el corte de julio la prueba de comparación de medias muestra que el nivel de NPK correspondiente a 190-78-44 kg ha⁻¹ es el que presenta valores más altos para la eficiencia de utilización para los tres elementos N, P y K, resultando ser diferente a los niveles de 381.156-89 y 286-78-44 kg ha⁻¹. Así, se muestra que el nivel de 50% de NPK presenta una media para EUN de 0.35 diferente a los niveles 100 y 75 % de NPK los cuales tienen una media de 0.24 y 0.28, respectivamente. Mismo caso se presenta para P donde el nivel de 50 % de NPK con una media de 0.46, resulta ser más alto que los niveles de 100 y 75 % de NPK con medias de 0.29 y 0.31, respectivamente. Así mismo, pasa con los valores de EUN para K donde el nivel de 50 % NPK

sobresale con una media de 3.69 sobre los niveles de 100 y 75 % de NPK que presentaron medias de 2.42 y 2.58, respectivamente (Anexo I).

Los resultados anteriormente mencionados indican que existe una relación inversa entre la cantidad de nutriente aplicado y la cantidad de nutriente absorbido. El hecho de encontrar estos resultados se debe posiblemente a las características propias de los suelos andisoles y el ambiente donde se desarrolla el cultivo, como lo manifiesta Mosquera (2020) quien en tomate de árbol encontró valores de EUN más altos cuando la dosis de fertilizante fue más baja y por el contrario cuando las dosis de fertilizante fueron más altas los valores de EUN se vieron reducidos. Así, la baja eficiencia de utilización de N en los niveles de 100 y 75% de NPK puede estar relacionado con las pérdidas causadas por lixiviación, teniendo en cuenta que la aplicación del fertilizante (Urea) se realizó en época de altas precipitaciones y como reportan Terry & McCants, (1970) la tasa de pérdidas de nitrógeno por lixiviación en un suelo arenoso puede variar de 1 a 5 mm mm⁻¹. Así mismo, el análisis físico donde se realizó la investigación reportó una textura franco arenosa, en este orden de ideas también se puede afirmar que la textura del suelo pudo estar involucrada en la baja eficiencia de utilización del N en las dosis alta y media aplicadas, teniendo en cuenta que Cantarella (2007) afirma que la textura del suelo también afecta la lixiviación, reportando que es mayor en suelos arenosos debido a que presentan menor micro porosidad, causando un movimiento más rápido del agua en sentido descendente. Resultados similares son reportados por Chen et al, (2004) quienes afirman que el uso de altas dosis de N puede llevar a una baja eficiencia de uso de los fertilizantes y consecuentemente a pérdidas por lixiviación.

Con respecto a P, la posible causa de encontrar valores de eficiencia de utilización más altos con el nivel de 50% de NPK es debido a la naturaleza del cultivo, es decir, posiblemente el pasto ryegrass no sea eficiente tomando el P, este hecho se puede respaldar según lo afirmado por Sierra-

Alarcón et al., (2019) quienes afirman que niveles crecientes de fertilización fosfatada no afectan las variables de rendimiento en el pasto Ryegrass, indicando que el rendimiento depende en su mayoría de la fertilización nitrogenada. Resultados similares encontraron W. X. Li et al. (2010) quienes reportan que el pasto ryegrass tiene una mayor respuesta a la fertilización nitrogenada, además de que esta favorece la absorción de P junto al K, destacando el sinergismo de estos tres elementos. Por otra parte, Wang et al., (2000) reporta que el ryegrass presenta niveles de absorción bajos tanto para P como para K.

Con relación a K, el hecho de encontrar este resultado se debe a que el suelo donde se desarrolló el estudio fue alto ($481.65 \text{ kg ha}^{-1}$) y cumplía con los requerimientos nutricionales del cultivo (296 kg ha^{-1}). Por esta razón, el nivel correspondiente al 50% de NPK presentó un valor más alto de eficiencia de utilización ya que la cantidad de fertilizante aplicado (KCl) se calculó a partir de la premisa de que en ausencia de necesidad de aplicación de dicho elemento se aplica el 30% del requerimiento del cultivo en este caso específico (89 kg ha^{-1}).

Por otra parte, los niveles de silicio mostraron una relación directamente proporcional con los valores de EUN para N en el corte de mayo y julio y para K en el corte de julio. En el corte de mayo la prueba de comparación de medias muestra que los niveles de Si de 100, 75 y 50 kg ha^{-1} presentaron unas medias de 0.55, 0.59 y 0.56, respectivamente, resultando ser iguales estadísticamente, y siendo diferentes al testigo sin silicio que presenta una media de 0.49 (Anexo I). Para el corte de julio el comportamiento fue diferente indicando que los niveles de 100 y 75 kg ha^{-1} presentaron las medias más altas de EUN con valores de 0.31 y 0.33, respectivamente, diferentes a los niveles de 50 y 0 kg ha^{-1} con medias de 0.27 y 0.26, respectivamente. Un resultado similar se presentó para valores de eficiencia de utilización en K, donde el nivel de 100 kg ha^{-1} resultó ser el más sobresaliente con una media de 3.22, seguido del nivel de 75 kg ha^{-1} con 3.12 y

el nivel de 50 kg ha⁻¹ con 2.68, siendo el testigo sin silicio el nivel con la media más baja de EUN con 2.58. Este resultado permite afirmar que un nivel diferencial de Si aplicado mejora la eficiencia de utilización de N y K. Como se menciona anteriormente esto se explica con lo afirmado por Tokunaga, (1991) quien reporta que las pérdidas de nutrientes de la solución del suelo con carga positiva del horizonte superficial del suelo se reducen debido a una superficie de sílice. Así mismo, Eneji y colaboradores (2005) informaron que la fertilización con silicato de potasio y calcio aumentó la concentración tisular de N y K.

4.10 Eficiencia de Utilización de Agua (EUA)

El análisis de varianza mostró que existe efecto de los dos factores (niveles de NPK y Si) de manera independiente y no en interacción. Así, los niveles de Si tuvieron efecto sobre la eficiencia de utilización de agua en el corte de mayo y los niveles de NPK y Si resultan tener efecto en el corte de julio (Tabla 12).

Tabla 12.

Cuadrados medios para Eficiencia de Utilización de Agua (EUA)

F. Variación	gl	Mayo	Julio	Agosto
Modelo	17	2.E-05	5.8E-06	6.E-06
Bloque	2	5.E-05	1.1E-06	2.E-06
NPK	2	3.E-05	2.2E-05*	2.E-05
Error a	4	1.E-05	2.5E-07	6.E-06
Si	3	9.2E-06*	9.7E-06*	6.E-06
NPK*Si	6	3.2E-06	3.8E-06	3.E-06
Error b	18	1.6E-06	1.8E-06	2.E-06
R ²		0.90	0.75	0.73
CV		9.07	12.82	20.96

* = Diferencias estadísticas

Fuente. Este estudio

La prueba de comparación de medias (Anexo J) mostró para los cortes de mayo y julio que los niveles diferenciales de Si resultan ser iguales y difieren solamente con el testigo sin silicio. De

este modo, en el corte de mayo los niveles de Si presentaron medias de 0.0146, 0.0145 y 0.014 cuando los niveles de silicio fueron de 50, 75 y 100 kg ha⁻¹, respectivamente. Y en el mes de Julio las medias fueron 0.0115 para 100 kg ha⁻¹, 0.0109 para el 75 kg ha⁻¹ y 0.0106 para 50 kg ha⁻¹. Resultando ser diferentes con el testigo sin silicio que presentó medias de 0.0124 (mayo) y 0.0090 (julio) (Anexo J).

Por otra parte, en el mes de julio los niveles diferenciales de NPK resultan ser diferentes entre todos donde la media más alta para la EUA lo presenta el nivel de 381-156-89 con 0.116 (Anexo J).

Encontrar mejor eficiencia de utilización de agua en los tratamientos que fueron fertilizados con Si, se debe posiblemente a que este elemento reduce la transpiración en las plantas, en este sentido, varios autores postulan que las plantas tratadas con Si se biosilifican, lo que implica la polimerización del ácido silícico dentro del apoplasto lo que conduce a la formación de una barrera de sílice amorfa en la hojas lo que puede ser responsable de la reducción en la transpiración y mejora la eficiencia del uso del agua en varias especies (Exley, 2015; Liu et al., 2014; Matoh et al., 1991; S. Wang et al., 2015; Yu et al., 2016), así mismo, Gong et al., (2013) reporta que el Si mejora la tolerancia al estrés causado por sequía en trigo debido a la reducción de pérdida de agua por transpiración. Por otra parte, Gao et al., (2006) reporta que la adición de Si en maíz no altera la transpiración cuticular, sin embargo, afirma que el Si está más relacionado con la regulación del movimiento de las estomas, sugiriendo que este mecanismo esta mediado por el Si incrementando la tolerancia a este tipo de estrés.

Las diferencias encontradas para los niveles de NPK se debe posiblemente a que tanto el fertilizante como el agua son factores más importantes para aumentar el rendimiento de los cultivos, y la fertilización adecuada mejoró la eficiencia del uso del agua (W. Li et al., 2004; Pala

et al., 2007; Stevens et al., 2006). Se ha informado que la fertilización aumenta la biomasa del forraje y la utilización de más agua por el pasto forrajero para asegurar el crecimiento normal del forraje. Además, el aumento de la biomasa del forraje aumenta la cobertura de pasto y reduce la evaporación del agua. En este sentido, Li et al., (2010) concluyen en su estudio sobre el efecto de la fertilización NPK sobre la utilización del agua que la combinación de NPK aumenta el rendimiento sostenible de forrajes y ha mejorado la eficiencia del uso del agua para conservar los recursos hídricos y fertilizantes.

- **Objetivo 4.** Realizar análisis económico de la dosificación de silicio en interacción con la dosificación de NPK y la producción de forraje verde.

4.11 Análisis económico

El análisis económico muestra que los tratamientos donde se usó un nivel de 50% NPK presentan una rentabilidad superior al 100%, no obstante, cabe mencionar que la producción de estos tratamientos es menor en alrededor del 25% de mejor tratamiento (100% NPK + 100% Si), además la calidad del pasto se vio reducida cuando el nivel de NPK de 50% fue aplicado. De este modo, el tratamiento que alcanzó mejor rentabilidad fue el que corresponde a una dosis de 100% de NPK con 100% de Si alto con una rentabilidad de 80%, seguido del tratamiento de 75% NPK con 100% de Si con una rentabilidad de 72%. Seguidos de estos, los mejores tratamientos fueron 100 % de NPK en interacción con 75% y 50% de Si los cuales presentaron una rentabilidad del 70% y 71%, respectivamente.

Cabe resaltar que los tratamientos donde se usó niveles de 50% NPK resultan ser más rentables pero acorde los resultados de la investigación no se podrían recomendar debido a que estos tratamientos presentan resultados diferenciales a los niveles de 100 y 50 % de NPK en la totalidad de las variables.

Además, como alternativa rentable que permite reducir la aplicación de fertilizantes en un 25% se presenta la interacción entre 75% de NPK y 100% de Si, con una rentabilidad del 72%.

Tabla 13.

Análisis económico

Tratamientos																								
	100% NPK + 100% Si		100% NPK + 75% Si		100% NPK + 50% Si		100% NPK		75% NPK + 100% Si		75% NPK + 75% Si		75% NPK + 50% Si		75% NPK		50% NPK + 100% Si		50% NPK + 75% Si		50% NPK + 50% Si		50% NPK	
Costos variables																								
Actividades	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo
Preparación del suelo		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000		\$ 320,000
Siembra	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000
Aplicación de fertilizantes	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000	4	\$ 100,000
Control de malezas	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000	2	\$ 50,000
Mano de obra total		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000		\$ 520,000
Insumos	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo	Unid	Costo
Semilla (kg/ha)	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000	50	\$ 425,000
Urea (kg/ha)	764	\$ 3,636,640	764	\$ 3,570,000	764	\$ 3,570,000	764	\$ 3,570,000	573	\$ 3,243,180	573	\$ 3,113,000	573	\$ 3,113,000	382	\$ 1,818,320	382	\$ 1,818,320	382	\$ 1,818,320	382	\$ 1,818,320	382	\$ 1,818,320
DAP (kg/ha)	164	\$ 657,640	164	\$ 601,500	164	\$ 601,500	164	\$ 601,500	123	\$ 493,230	123	\$ 493,230	123	\$ 493,230	82	\$ 328,820	82	\$ 328,820	82	\$ 328,820	82	\$ 328,820	82	\$ 328,820
KCl (kg/ha)	179	\$ 700,248	179	\$ 782,400	179	\$ 782,400	179	\$ 782,400	134	\$ 525,186	134	\$ 525,186	134	\$ 525,186	134	\$ 525,186	89.5	\$ 350,124	89.5	\$ 350,124	89.5	\$ 350,124	89.5	\$ 350,124
SiO (kg/ha)	100	\$ 175,600	75	\$ 131,700	50	\$ 87,800	0	\$ -	100	\$ 175,600	75	\$ 131,700	50	\$ 87,800	0	\$ -	100	\$ 175,600	75	\$ 131,700	50	\$ 87,800	0	\$ -
Herbicida (lt/ha)	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800	2	\$ 69,800
Insumos total		\$ 5,664,928		\$ 5,580,400		\$ 5,536,500		\$ 5,448,700		\$ 4,931,996		\$ 4,757,916		\$ 4,714,016		\$ 4,626,216		\$ 3,167,664		\$ 3,123,764		\$ 3,079,864		\$ 2,992,064
Otros (1% costos variables)		\$ 61,849		\$ 61,004		\$ 60,565		\$ 59,687		\$ 54,520		\$ 52,779		\$ 52,340		\$ 51,462		\$ 36,877		\$ 36,438		\$ 35,999		\$ 35,121
SUBTOTAL		\$ 6,246,777		\$ 6,161,404		\$ 6,117,065		\$ 6,028,387		\$ 5,506,516		\$ 5,330,695		\$ 5,286,356		\$ 5,197,678		\$ 3,724,541		\$ 3,680,202		\$ 3,635,863		\$ 3,547,185
Costos fijos																								
Administración (3% costos variables)		\$ 187,403.32		\$ 184,842.12		\$ 183,511.95		\$ 180,851.61		\$ 165,195.48		\$ 159,920.85		\$ 158,590.68		\$ 155,930.34		\$ 111,736.22		\$ 110,406.05		\$ 109,075.88		\$ 106,415.54
Imprevistos (5% costos variables)		\$ 312,338.86		\$ 308,070.20		\$ 305,853.25		\$ 301,419.35		\$ 275,325.80		\$ 266,534.76		\$ 264,317.81		\$ 259,883.91		\$ 186,227.03		\$ 184,010.08		\$ 181,793.13		\$ 177,359.23
SUBTOTAL		\$ 499,742		\$ 492,912		\$ 489,365		\$ 482,271		\$ 440,521		\$ 426,456		\$ 422,908		\$ 415,814		\$ 297,963		\$ 294,416		\$ 290,869		\$ 283,775
PRODUCCIÓN																								
Producción de forraje verde (t/ha/año)		166.45		155		154.97		147.95		140.26		130.52		127.97		127.32		126.29		124.96		124.01		122.76
Producción de forraje verde (kg/ha/año)		166450		155000		154970		147950		140260		130520		127970		127320		126290		124960		124010		122760
Valor comercial del kilogramo de pasto	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140	\$	140
COSTOS TOTALES (\$)	\$	12,931,447	\$	12,754,716	\$	12,662,930	\$	12,479,358	\$	11,399,033	\$	11,035,067	\$	10,943,281	\$	10,759,708	\$	7,710,168	\$	7,618,382	\$	7,526,596	\$	7,343,023
BENEFICIO BRUTO (\$)	\$	23,303,000	\$	21,700,000	\$	21,695,800	\$	20,713,000	\$	19,636,400	\$	18,272,800	\$	17,915,800	\$	17,824,800	\$	17,680,600	\$	17,494,400	\$	17,361,400	\$	17,186,400
BENEFICIO NETO (\$)	\$	10,371,553	\$	8,945,284	\$	9,032,870	\$	8,233,642	\$	8,237,367	\$	7,237,733	\$	6,972,519	\$	7,065,092	\$	9,970,432	\$	9,876,018	\$	9,834,804	\$	9,843,377
RENTABILIDAD (%)		80%		70%		71%		66%		72%		66%		64%		66%		129%		130%		131%		134%

Conclusiones

- Las variables de rendimiento del pasto ryegrass aubade (*Lolium* sp.) resultaron potenciadas por el uso de niveles diferenciales de NPK en interacción con niveles de Si; para las variables de forraje verde y producción de materia seca, siendo en general los mejores tratamientos de 381-156-89 kg ha⁻¹ de NPK en interacción con 100 y 75 kg ha⁻¹ de Si.
- Las variables IAF, TCA, TCR y TAN se ven influenciadas por los niveles diferenciales de NPK, siendo el nivel de 381-156-89 kg ha⁻¹, el más sobresaliente.
- La interacción entre los niveles de NPK y Si, favorece la absorción de los nutrientes nitrógeno, fosforo y potasio a nivel foliar, presentando la mayor concentración a los 40 días de la fase vegetativa del cultivo.
- Los coeficientes de utilización biológica, eficiencia de utilización de nutrientes y eficiencia de utilización de responden positivamente a los niveles de Si.
- La interacción de 381-156-89 kg ha⁻¹ de NPK en interacción con 100 kg ha⁻¹ de Si se presenta como la opción con mayor rentabilidad y como una alternativa económica 286 – 117 – 67 kg ha⁻¹ de NPK en interacción con 100 kg ha⁻¹.

Referencias

- Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Qayyum, M. F., & Irshad, M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 119, 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>
- Alvarez, J., & Datnoff, L. E. (2001). Chapter 14 The economics of silicon for integrated management and sustainable production of rice and sugarcane. *Studies in Plant Science*, 8(C), 221–239. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80018-5](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80018-5)
- Balta Crisólogo, A. R., Del Castillo Rodríguez, Á. M., Guerrero Abad, R., Cachique, D., Alva Plasencia, E., Arévalo López, L., & Loli, O. (2015). ABSORCIÓN Y CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO , FÓSFORO Y POTASIO EN SACHA INCHI (*Plukenetia volubilis* L .) EN SUELOS ÁCIDOS , SAN MARTÍN , PERÚ ABSORPTION AND CONCENTRATION OF NITROGEN , PHOSPHORUS AND POTASSIUM IN SACHA INCHI (*Plukenetia volubilis* L .) PLANT. *Folia Amazónica*, 24(2), 123–130. <http://www.iiap.org.pe/upload/publicacion/PUBL1446.pdf>
- Barros, N. F., Novais, R. F., Carmo, D. N., & Neves, J. C. L. (1986). Classificação nutricional de sitios florestis. In *Descrição de una metodologia*. (pp. 106–112).
- Bernal, J., & Espinosa, J. (2003). *MANUAL DE NUTRICION Y FERTILIZACION DE PASTOS*. International Plant Nutrition Institute (IPNI).
- Bertsch, F. (1981). *Nutrición mineral de hortalizas: curvas de absorción de nutrientes*. CATIE.
- Bertsch, Floria. (2009). Absorción de nutrimentos por los cultivos. In *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Cantarella, H. (2007). Nitrogênio. In R. Ferreira Novais, V. H. Alvarez, N. F. de Barros, R. L.

- Fontes, R. Bertola Cantarutti, & J. C. Lima Neves (Eds.), *Fertilidade do solo* (pp. 376–449).
- Chen, J. (2006). The combined use of chemical and organic fertilizers and/or biofertilizer for crop growth and soil fertility. *International Workshop on Sustained Management of the Soil-Rhizosphere System for Efficient Crop Production and Fertilizer Use*.
- Chiba, Y., Mitani, N., Yamaji, N., & Ma, J. F. (2009). HvLsi1 is a silicon influx transporter in barley. *Plant Journal*, 57(5), 810–818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03728.x>
- Coskun, D., Britto, D. T., Huynh, W. Q., & Kronzucker, H. J. (2016). The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01072>
- De Luca, E. F., Boaretto, A. E., Muraoka, T., & Chitolina, J. C. (2002). EFICIÊNCIA DE ABSORÇÃO E UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO (32 P) POR MUDAS DE EUCALIPTO E ARROZ. *Scientia Agricola*, 59(3), 543–547.
- Derkowska, E., Paszt, L., Trzciński, P., Przybył, M., & Weszczak, K. (2015). Influence of biofertilizers on plant growth and rhizosphere microbiology of greenhouse-grown strawberry cultivars. *Acta Sci. Pol.-Hortorum Cultus.*, 14(6), 83–96.
- Dibb, D. (2000). Eficiencia de uso de nutrientes: Verdades y Mitos. *Informaciones Agronomicas*, 2(42), 1–12.
- Dobermann, A. (2007). Nutrient use efficiency – measurement and management. In *Fertilizer Best Management Practices* (pp. 1–28).
- Eneji, E., Inanaga, S., Muranaka, S., Li, J., An, P., Hattori, T., & Tsuji, W. (2005). Effect of calcium silicate on growth and dry matter yield of *Chloris gayana* and *Sorghum sudanense* under two soil water regimes. *Grass and Forage Science*, 60(4), 393–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2005.00491.x>

- Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *National Academy of Sciences of the United States of America*, 91, 11–17.
- Epstein, E. (1999). Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 50, 641–664.
- Ernani, P. R., de Almeida, J. A., & dos Santos, F. C. (2007). Potássio. In *Fertilidade do solo* (pp. 552–589). Sociedade Brasileira da Ciencia do Solo.
- Exley, C. (2015). *A possible mechanism of biological silicification in plants*. 6, 1–7.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00853>
- Ferreira Novais, R., Smyth, T., & Novais Nunes, F. (2007). Fósforo. In *Fertilidade do solo* (pp. 472–537). Sociedade Brasileira da Ciencia do Solo.
- Freire, F. J., Cesar, F., & Alvarez, V. H. (2004). *Balance De Nutrientes Y Recomendación De Fertilizantes Y Encalado En Caña De Azúcar Por Modelaje*. 1–12.
- Fulkerson, W. J., Neal, J. S., Clark, C. F., Horadagoda, A., Nandra, K. S., & Barchia, I. (2007). Nutritive value of forage species grown in the warm temperate climate of Australia for dairy cows: Grasses and legumes. *Livestock Science*, 107(2–3), 253–264.
<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2006.09.029>
- Gao, X., Zou, C., & Wang, L. (2006). Silicon Decreases Transpiration Rate and Conductance from Stomata of Maize Plants. *Journal of Plant Nutrition*, 29(9), 37–41.
<https://doi.org/10.1080/01904160600851494>
- Gong, H., Chen, K., Chen, G., Wang, S., & Zhang, C. (2013). Effects of Silicon on Growth of Wheat Under Drought Effects of Silicon on Growth of Wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 26(5), 37–41. <https://doi.org/10.1081/PLN-120020075>
- Gong, W., Yan, X. Y., Wang, J. Y., Hu, T. X., & Gong, Y. B. (2009). Longterm manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools under a wheat-maize cropping system in

- North China Plain. *Plant Soil*, 314, 67–76.
- Grahmann, K., Verhulst, N., Buerkert, A., Ortiz-Monasterio, I., & Govaerts, B. (2013). Nitrogen use efficiency and optimization of nitrogen fertilization in conservation agriculture. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 8(April 2018), 1–19. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20138053>
- Guerrero, R. (1998). *Fertilización de cultivos en clima frío* Editor: Ricardo Guerrero Riascos. <http://www.monomeros.com/descargas/dpmanualfrio.pdf>
- Guntzer, F., Keller, C., & Meunier, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 201–213. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., Nelson, W. R., & Nelson, W. L. (2017). *Soil Fertility and Fertilizers*.
- Hernandez-Apaolaza, L. (2014). Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. *Planta*, 240(3), 447–458. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>
- Hodson, M., & Sangster, A. (2002). Silicon and abiotic stress. In *Second Silicon Agriculture Conference* (pp. 99–104). Japanes Society of Soil Science and Plant Nutrition.
- Holdridge, L. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- Hossain, M. T., Mori, R., Soga, K., Wakabayashi, K., Kamisaka, S., Fujii, S., Yamamoto, R., & Hoson, T. (2002). Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. *Journal of Plant Research*, 115(1), 23–27. <https://doi.org/10.1007/s102650200004>
- Hunt, R., Causton, D. R., Shipley, B., & Aswek, A. P. (2002). A Modern Tool for Classical Plant

- Growth Analysis. *Annals of Botany*, 90(4), 485–488. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf214>
- Isa, M., Bai, S., Yokoyama, T., Ma, J. F., Ishibashi, Y., Yuasa, T., & Iwaya-Inoue, M. (2010). Silicon enhances growth independent of silica deposition in a low-silica rice mutant, *lsi1*. *Plant and Soil*, 331(1), 361–375. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0258-9>
- Jawahar, S., Kalaiyarasan C., Sriramachandrasekharan, M.V., Neeru, J., & Naveenkumar, M. (2017). Effect of orthosilicic acid formulations on growth and yield of maize in different soils Jawahar. *7th International Conference on Silicon in Agriculture*.
- Jayanthi, C., Malarvizhi, P., Fazullah Khan, A., & Chinnusamy, C. (2002). Integrated nutrient management in forage oat (*Avena sativa* L.). *Indian Journal Agronomy*, 47(1), 130–133.
- Knight, C., & Kinrade, S. (2001). A primer on the aqueous chemistry of silicon Christopher. In L. E. Datnoff, G. . Snyder, & G. H. Korndorfer (Eds.), *Silicon in Agriculture* (pp. 57–85).
- Komisarov, I., & Panfilova, L. (1987). *The method for production of slowly soluble fertilizer*.
- Lawlor, D. W. (2002). Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding production systems. *Journal of Experimental Botany*, 53(370), 773–787. <https://doi.org/10.1093/jxb/53.370.773>
- Legarda Lopez, D., Benavidez Cuesta, G., & Ruiz Erazo, H. (2015). Respuesta del pasto raigrass aubade (*Lolium* sp.) a dosis de silicio en interacción con diferentes dosis de npk. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(1), 99–109. [https://doi.org/10.18684/bsaa\(13\)99-109](https://doi.org/10.18684/bsaa(13)99-109)
- Li, W., Li, Z., & Li, W. (2004). Effect of the niche-fitness at different water supply and fertilization on yield of spring wheat in farmland of semi-arid areas. *Agricultural Water Management*, 67, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.12.007>
- Li, W. X., Lu, J. W., Chen, F., & Li, X. K. (2010). Effect of NPK application on yield, nutrients

- and water utilization under sudangrass and ryegrass rotation regime. *Agricultural Sciences in China*, 9(7), 1026–1034. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60186-3](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60186-3)
- Li, X. Y., Zhao, B. Q., Li, X. H., Li, Y. T., Sun, R. L., Zhu, L. S., Xu, J. W., & Li X P, Z. F. D. (2005). Effects of different fertilization systems on soil microbe and its relation to soil fertility. *Scientia Agricultura Sinica*, 38, 1591–1599.
- Liang, Y., Nikolic, M., Bélanger, R., Gong, H., & Song, A. (2015). Silicon in agriculture: From theory to practice. In *Silicon in Agriculture: From Theory to Practice*. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9978-2>
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147(2), 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Lindsay, W. (1979). *Chemical equilibria in soils*. Wiley Interscience.
- Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., & Zhang, S. (2014). *Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in Sorghum bicolor L*. 65(17), 4747–4756. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru220>
- Lopes, M., Fernandes, R., Duarte, M., Lacerda, C., Da Silva, R., & Belem, F. (2011). Growth index in massai grass under different levels of nitrogen fertilization. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40(12), 2666–2672.
- Ma, J. F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50(1), 11–18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>
- Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). *Soil, Fertilizer and Plant Silicon Research in Japan*.

- Ma, J. F., Tamai, K., Yamaji, N., Mitani, N., Konishi, S., Katsuhara, M., Ishiguro, M., Murata, Y., & Yano, M. (2006). A silicon transporter in rice. *Nature*, 440(7084), 688–691.
<https://doi.org/10.1038/nature04590>
- Manan, M. C., Swarup, A., Wanjari, R. H., Ravankar, H. N., Mishra, B., Saha, M. N., Singh, Y. V, Sahi, D. K., & Sarap, P. A. (2009). Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India. *Filed Crops Research*, 93, 264–280.
- Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants. In *Mineral nutrition of higher plants*.
- Matichenkov, V., & Ammosova, Y. (1996). Effect of amorphous silica on soil properties of asod-podzolic soil. *Eurasian Soil Sci*, 28, 87–99.
- Matoh, T., Murata, S., & Takahashi, E. (1991). Effect of silicate application on photosynthesis of rice [*Oryza sativa*] plants. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition (Japan)*, 62(3), 248–251.
- Mazza, L. de M., Motta, A. C. V., de Moraes, A., Vezzani, F. M., Adami, P. F., & Rabel, D. de O. (2012). Forage yield and quality on soil subjected to phosphorus rates in subtropical grassland of Brazil. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41(5), 1100–1109.
<https://doi.org/10.1590/S1516-35982012000500004>
- Medrano, H., Bota, J., Cifre, J., Flexas, J., Ribas-Carbó, M., & Gulías, J. (2007). EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA POR LAS PLANTAS. *Investigaciones Geográficas*, 43, 63–84.
- Mendes, L. (2006). *Eficiência nutricional nos cultivares de cana-de-açúcar*.
<http://www.tede.ufv.br>.
- Mitani, N., Chiba, Y., Yamaji, N., & Ma, J. F. (2009). Identification and characterization of

maize and barley Lsi2-like silicon efflux transporters reveals a distinct silicon uptake system from that in rice. *Plant Cell*, 21(7), 2133–2142.

<https://doi.org/10.1105/tpc.109.067884>

Mosquera Guerrero, J. H. (2020). *Respuesta fisiológica del tomate de árbol (Solanum betaceum Cav.) a diferentes regímenes hídricos y niveles de fertilizante, en un suelo andisol del departamento de Nariño* [Universidad Nacional de Colombia].

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78719>

Name, B. (2006). *Compendio de Resultados de Investigación del Programa de Suelos del IDIAP* (Issue January). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4704.8806>

Nascimento, A. M., Assis, F. A., Moraes, J. C., & Souza, B. H. S. (2018). Silicon application promotes rice growth and negatively affects development of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Journal of Applied Entomology*, 142(1–2), 241–249.

<https://doi.org/10.1111/jen.12461>

Pala, M., Ryan, J., Zhang, H., Singh, M., & Harris, H. C. (2007). Water-use efficiency of wheat-based rotation systems in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management*, 93, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.07.001>

Pérez Vélez, J. P. (2014). Uso de los fertilizantes y su impacto en la producción agrícola. In *Universidad Nacional de Colombia*.

<http://www.bdigital.unal.edu.co/39459/1/71782231.2014.pdf>

Pirela, M. (2005). Valor nutritivo de los pastos tropicales. In *Manual de ganadería de doble propósito Instituto Nacional de Investigaciones agrícolas - INIA* (pp. 176–181).

Pontigo, S., Godoy, K., Jiménez, H., Gutiérrez-Moraga, A., Mora, M. D. L. L., & Cartes, P. (2017). Silicon-mediated alleviation of aluminum toxicity by modulation of al/si uptake and

- antioxidant performance in ryegrass plants. *Frontiers in Plant Science*, 8(April), 1–15.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00642>
- Pontigo, S., Ribera, A., Gianfreda, L., de la Luz Mora, M., Nikolic, M., & Cartes, P. (2015). Silicon in vascular plants: Uptake, transport and its influence on mineral stress under acidic conditions. *Planta*, 242(1), 23–37. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2333-1>
- Prifti, D., & Maçi, A. (2017). Effect of Herbagreen Nano-Particles on Biochemical and Technological Parameters of Cereals (Wheat and Corn). *European Scientific Journal, ESJ*, 13(6), 72. <https://doi.org/10.19044/esj.2017.v13n6p72>
- Quero, E. (2006). *Silicio en la producción agrícola*. Instituto Tecnológico Superior de Uruapan.
- Richmond, K., & Sussman, M. (2003). Got silicon? The nonessential beneficial plant nutrient. *Current Opinion in Plant Biology*, 6, 268–272.
- Rincon, Á., Ligarreto, G. A., & Sanjuanelo, D. (2007). Crecimiento del maíz y los pastos establecidos y asociados en suelos ácidos del piedemonte llanero colombiano. *Agronomía Colombiana.*, 25(2), 264–272.
- Saénz Fety. (2021). *Catálogo de Pastos y forrasjes de clima frio*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fsaenzfety.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F07%2Fcatalogo_forrajes_clima_frio.pdf&cflen=4593938&chunk=true
- Sancho, H. (1993). Curvas De Absorcion De Nutrientes : Importancia Y Uso En Los Programas De Fertilizacion. *Informaciones Agronomicas*, 36, 11–13.
[http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/765C8D66598A491B852579A3007A3289/\\$FILE/Curvas de Absorción.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/765C8D66598A491B852579A3007A3289/$FILE/Curvas%20de%20Absorci%C3%B3n.pdf)

- Sierra-Alarcón, A., Moreno-Oviedo, Y., Mancipe-Muñoz, E. A., Avellaneda-Avellaneda, Y., & Vargas-Martínez, J. D. J. (2019). Effect of nitrogen and phosphate fertilization on perennial ryegrasses and red clovers. *Agronomy Mesoamerican*, 30(3), 841–854.
<https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35170>
- Steudle, E., & Peterson, C. (1998). How does water get through roots? *Exp. Bot.*, 49, 775–788.
- Stevens, M. H. H., Shirk, R., & Steiner, C. E. (2006). Water and fertilizer have opposite effects on plant species richness in a mesic early successional habitat Water and fertilizer have opposite effects on plant species richness in a mesic early successional habitat. *Plant Ecology*, 183, 27–34. <https://doi.org/10.1007/s11258-005-9003-5>
- Stevenson F.J., & Cole, M. A. (1999). Phosphorous. In *Cycles of Soil: Carbon, Nitrogen, Phosphorous, Sulfur, Microbutrients* (pp. 279–329). Wiley & Sons, Inc.
- Stewart, W. M. (2007). CONSIDERACIONES EN EL USO EFICIENTE DE NUTRIENTES. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*, 67, 1–10.
- Terry, D., & McCants, C. (1970). Quantitative prediction of leaching in field soils. *Soil Science*, 34, 271–276.
- Tokunaga, Y. (1991). Potassium silicate: A slow-release potassium fertilizer. *Fertilizer Research*, 30(1), 55–59. <https://doi.org/10.1007/BF01048827>
- Torres-Moya, E., Ariza-Suarez, D., Baena-Aristizabal, C. D., Cortes-Gomez, S., Becerra-Mutis, L., & Riaño-Hernandez, C. A. (2016). Efecto de la fertilización en el crecimiento y desarrollo del cultivo de la avena (*Avena sativa*). *Pastos y Forrajes*, 39(2), 102–110.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942016000200004&nrm=iso
- Trindade, A. V., Muchovej, R. M. C., Neves, J. C. L., & Barros, N. F. (2001). Crescimento e

- nutrição de mudas de *Eucalyptus grandis* em resposta a composto orgânico ou adubação mineral. *Revista Ceres*, 48(276), 181–194.
- Van Bockhaven, J., De Vleeschauwer, D., & Hofte, M. (2012). Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: silicon leads the way. *Journal of Experimental Botany*, 63(2), 695–709. <https://doi.org/10.1093/jxb/err313>
- Vargas- Martínez, J. D. J., Sierra-Alarcón, A., Benavidez-Cruz, J., Avellaneda-Avellaneda, Y., & Ariza-Nieto, C. (2018). Establecimiento y producción de raigrás y tréboles en dos regiones del trópico alto colombiano. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 177. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.28077>
- Villalobos, L., & Sánchez, J. M. (2009). Evaluación agronómica y nutricional del pasto *Ryegrass perenne tetraploide* (*Lolium perenne*) producido en lecherías de las zonas altas de Costa Rica. I. Producción de biomasa y fenología. *Agronomía Costarricense*, 34(1), 31–42. <https://doi.org/10.15517/rac.v34i1.6697>
- Volker, H. W. N., & K. A. (1985). Verfahren zur herstellung eines mehrnährstoffdüngers. *Fels-Werke Peine-Salzgitter GmbH, Pat.*
- Vulavala, V. K. R., Elbaum, R., Yermiyahu, U., Fogelman, E., Kumar, A., & Ginzberg, I. (2016). Silicon fertilization of potato: expression of putative transporters and tuber skin quality. *Planta*, 243(1), 217–229. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2401-6>
- Wang, C. Y., Gou, J. P., Wang, X. L., Xu, S. H., Cui, D. C., & Liang, H. (2000). The experimental study of the effects of CO₂ concentration enrichment on physiological feature of C₃ and C₄ crops. *Agronomica Sinica*, 26, 813–817.
- WANG, F., & PENG, S. B. (2017). Yield potential and nitrogen use efficiency of China's super rice. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(5), 1000–1008.

[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61561-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61561-7)

- Wang, S., Peng, L., Daoqian, C., Lina, Y., Hongbing, L., & Deng, X. (2015). *Silicon enhanced salt tolerance by improving the root water uptake and decreasing the ion toxicity in cucumber*. 6, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00759>
- White, B., Tubana, B. S., Babu, T., Mascagni, H., Agostinho, F., Datnoff, L. E., & Harrison, S. (2017). Effect of silicate slag application on wheat grown under two nitrogen rates. *Plants*, 6(4), 1–14. <https://doi.org/10.3390/plants6040047>
- Yamaji, N., & Jian Feng, M. (2009). A transporter at the node responsible for intervascular transfer of silicon in rice. *Plant Cell*, 21(9), 2878–2883. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.069831>
- Yu, S., Yi, Z., Weihua, H., Ru, F., Yanhong, H., Jia, G., & Gong, H. (2016). *Silicon Enhances Water Stress Tolerance by Improving Root Hydraulic Conductance in Solanum*. 7, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00196>
- Zhu, Y., & Gong, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 455–472. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>

Anexos

Anexo A. Medias para las variables producción de forraje verde (PFV), producción de materia seca (PMS) y altura de planta (AP) para la interacción de niveles de NPK y Si.

Corte mayo				
NPK	Si	Medias		
		PFV	PMS	AP
381-156-89	75	44.67	5.38	80.17
381-156-89	50	44.37	5.17	84.03
381-156-89	100	42.58	4.80	82.72
286-117-67	100	40.12	4.70	84.22
381-156-89	0	37.28	4.29	79.85
190-78-44	50	34.19	4.05	79.40
286-117-67	75	33.43	4.02	75.97
190-78-44	75	31.78	3.80	75.50
190-78-44	100	31.55	3.73	72.60
190-78-44	50	30.99	3.64	72.88
190-78-44	0	30.45	3.59	73.07
286-117-67	0	29.76	3.51	77.04
Corte julio				
NPK	Si	Medias		
		PFV	PMS	
381-156-89	75	33.83	4.54	
381-156-89	50	34.58	4.34	
286-117-67	75	30.48	3.92	
381-156-89	100	31.19	3.79	
286-117-67	100	25.13	3.46	
190-78-44	100	26.08	3.28	
286-117-67	50	24.12	3.09	
286-117-67	0	23.51	3.04	
190-78-44	0	23.63	2.82	
381-156-89	0	22.55	2.79	
190-78-44	50	21.70	2.72	
190-78-44	75	21.33	2.63	

Anexo B. Comparación de medias corte de agosto para las variables producción de forraje verde y producción de materia seca para niveles de NPK.

NPK	Corte Agosto	
	Medias	
	PFV	PMS
381-156-89	15,78 a	2,81 a
286-117-67	10,34 b	1,83 b
190-78-44	9,51 b	1,76 b

Anexo C. Comparación de medias IAF para niveles de NPK en el corte de mayo

Corte mayo	
NPK	Medias
	IAF
381-156-89	3.00 a
286-117-67	2.53 ab
190-78-44	2.04 b

Anexo D. Comparación de medias para peso de planta y área foliar a 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización.

NPK	Medias - Peso planta (g)		
	15 días	30 días	40 días
381-156-89	0.53 a	1.19 a	15.65 a
286-117-67	0.46 b	1.16 a	12.17 ab
190-78-44	0.36 c	0.74 b	8.22 b
NPK	Medias - Área foliar (cm ² planta ⁻¹)		
	15 días	30 días	40 días
381-156-89	77.72 a	190.56 a	352.47 a
286-117-67	77.57 a	175.47 a	297.37 ab
190-78-44	45.39 b	138.64 b	239.45 b

Anexo E. Comparación de medias para los índices de crecimiento TCA, TCR y TAN

NPK	TCA	
	30 días	40 días
381-156-89	0.05 a	1.45 a
286-117-67	0.04 a	1.1 ab
190-78-44	0.03 b	0.75 b
NPK	TCR	
	30 días	40 días
381-156-89	0.06 a	0.26 a
286-117-67	0.06 ab	0.23 a
190-78-44	0.05 b	0.22 a
NPK	TAN	
	30 días	40 días
381-156-89	0.00038 a	0.01 a
286-117-67	0.00038 a	0.0049 a
190-78-44	0.00031 b	0.0039 a

Anexo F. Medias para NPK en interacción con silicio a los 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización.

Nitrógeno (g/planta)					
NPK	Si	Medias		NPK	30
		15	40		
286-117-67	75	0,03	0,43	286-117-67	0,05 a
381-156-89	75	0,02	0,85	381-156-89	0,05 a
381-156-89	50	0,02	0,58	190-78-44	0,03 b
286-117-67	0	0,02	0,35		
381-156-89	100	0,02	0,65		
286-117-67	100	0,02	0,56		
286-117-67	50	0,01	0,42		
381-156-89	0	0,01	0,36		
190-78-44	100	0,01	0,46		
190-78-44	75	0,01	0,25		
190-78-44	0	0,01	0,28		
190-78-44	50	0,01	0,29		
Fósforo (mg/planta)					
NPK	Si	Medias		NPK	30
		15	40		
286-117-67	75	2,89	0,90	381-156-89	3,69 a
381-156-89	75	2,15	1,67	286-117-67	3,66 a
381-156-89	50	2,14	1,32	190-78-44	2,36 b
286-117-67	0	2,02	0,82		
381-156-89	100	1,65	1,17		
286-117-67	100	1,58	1,16		
286-117-67	50	1,50	0,98		
190-78-44	50	1,33	0,65		
381-156-89	0	1,25	0,89		
190-78-44	0	1,20	0,58		
190-78-44	100	1,05	1,01		
190-78-44	75	0,94	0,50		

Potasio (g/planta)					
NPK	Si	Medias			
		15	40	NPK	30
286-117-67	75	0,06	0,90	381-156-89	0,11 a
381-156-89	50	0,05	1,32	286-117-67	0,10 a
381-156-89	75	0,04	1,67	190-78-44	0,07 b
286-117-67	0	0,04	0,82		
286-117-67	100	0,03	1,16		
381-156-89	0	0,03	0,89		
190-78-44	0	0,03	0,58		
286-117-67	50	0,03	0,98		
381-156-89	100	0,03	1,17		
190-78-44	100	0,02	1,01		
190-78-44	75	0,02	0,50		
190-78-44	50	0,02	0,65		

Anexo G. Comparación de medias para NPK en interacción con silicio a los 15, 30 y 40 días después del corte de uniformización.

Silicio (g/planta)		
NPK	Si	Medias
381-156-89	75	0.25
381-156-89	50	0.25
286-117-67	100	0.19
381-156-89	100	0.18
190-78-44	100	0.17
381-156-89	0	0.15
286-117-67	50	0.15
286-117-67	75	0.14
286-117-67	0	0.12
190-78-44	50	0.09
190-78-44	0	0.09
190-78-44	75	0.08

Anexo H. Comparación de medias de Coeficiente de Utilización Biológica (CUB)

Corte mayo					
NPK	Si	Medias - CUB			
		P	Si	K	
381-156-89	50	28.85	75	0.67 a	
381-156-89	100	0.86	100	0.65 a	
286-117-67	100	20.77	50	0.62 ab	
381-156-89	75	19.87	0	0.53 b	
190-78-44	75	18.67			
286-117-67	50	17.54			
286-117-67	75	17.40			
190-78-44	50	15.89			
381-156-89	0	15.84			
190-78-44	0	15.38			
286-117-67	0	15.25			
190-78-44	100	15.14			
Corte julio					
NPK	Medias - CUB				
	N	P	K	Si	N
286-117-67	1.48 a	17.67 a	0.71 a	50	1.50 a
381-156-89	1.46 a	13.53 b	0.64 b	75	1.47 a
190-78-44	1.24 b	11.10 b	0.49 c	100	1.41 ab
				0	1.20 b
Corte agosto					
Si	Medias - CUB				
	P				
100	9.36 a				
50	6.75 b				
0	6.22 b				
75	5.62 b				

Anexo I. Comparación de medias de Eficiencia de Utilización de Nutrientes (EUN)

Corte mayo						
Medias - EUN						
Si		N				
75		0.59 a				
50		0.56 a				
100		0.55 a				
0		0.49 b				
Corte julio						
Medias - EUN						
NPK	N	P	K	Si	N	K
190 – 78 – 44	0.35 a	0.46 a	3.69 a	75	0.33a	3.12 ab
286 – 117 – 67	0.28 b	0.31 b	2.58 b	100	0.31 ab	3.22 a
381 – 156 – 89	0.24 b	0.29 b	2.42 b	50	0.27 b	2.68 bc
				0	0.26 b	2.58 c

Anexo J. Comparación de medias de Eficiencia de Utilización de Agua (EUA)

Medias - EUN				
Nivel Si	Mayo	Julio	Nivel NPK	Julio
50	0.0146 a	0,0115 a	381 – 156 – 89	0.0116 a
75	0.0145 a	0,0109 a	286 – 117 – 67	0.0109 b
100	0.014 a	0,0106 a	190 – 78 – 44	0.009 c
0	0.0124 b	0,0090 b		