



UNL

Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

Carrera de Ingeniería Agronómica

“Desarrollo de la curva crítica de dilución del nitrógeno para quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el sector La Argelia, Loja”.

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera
Agrónoma

AUTORA:

Gabriela Marisol Jiménez Jiménez

DIRECTOR:

Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute PhD

Loja – Ecuador

2022



Universidad
Nacional
de Loja

FACULTAD AGROPECUARIA Y DE
RECURSOS NATURALES RENOVABLES
AGRONOMIA

Certificación

Loja, 29 de agosto de 2022

Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute PhD

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **“Desarrollo de la curva crítica de dilución del nitrógeno para quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el sector La Argelia, Loja”**, previo a la obtención del título de **Ingeniera Agrónoma**, de la autoría de la estudiante **Gabriela Marisol Jiménez Jiménez**, con **cédula de identidad Nro. 1105671489**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:
**SANTIAGO
CRISTOBAL VASQUEZ
MATUTE**

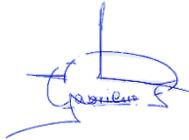
Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute PhD

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Gabriela Marisol Jiménez Jiménez**, declaro ser autora del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula: 1105671489

Fecha: 13/12/2022

Correo electrónico: gabriela.m.jimenez@unl.edu.ec

Celular: 0959759125

Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del trabajo de titulación.

Yo, **Gabriela Marisol Jiménez Jiménez**, declaro ser autora del Trabajo de Titulación denominado “**Desarrollo de la curva crítica de dilución del nitrógeno para quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el sector La Argelia, Loja**” como requisito para optar al grado de **Ingeniero Agrónomo**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los trece días del mes de diciembre de dos mil veintidós.



Firma:

Autora: Gabriela Marisol Jiménez Jiménez

Cédula: 1105671489

Dirección: San Pedro de Bellavista

Correo electrónico: gabymjj20@gmail.com

Celular: 0959759125

DATOS COPLEMENTARIOS:

Director del Trabajo de Titulación: Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute PhD

Dedicatoria

Este y todos los logros que alcance en mi vida se los dedico a mis hijos Alisson y Carlitos que son la más valiosa inspiración que tengo y el motivo que me impulsa a continuar y esforzarme por ser una mejor persona para ellos.

A mis padres Carlos Jiménez y Esthela Jiménez y hermanas quienes han sido la guía, me han brindado su apoyo incondicional, motivación e impulso para poder culminar esta gran meta; gracias infinitas.

Con amor a Darío, por animarme siempre, por estar presente cada vez que necesitaba apoyo y por cumplir con el rol de padre a cabalidad, gracias a eso pude prepararme y lograr cumplir esta meta tan anhelada.

Al inicio me parecía imposible culminar la carrera, pero con constancia, dedicación y esfuerzo lo logre es por eso que me la dedico a mí, porque este es el resultado de mucho esfuerzo que demuestra que todo lo que me proponga es posible lograrlo.

Gabriela Marisol Jiménez Jiménez

Agradecimiento

Agradezco infinitamente a Dios porque ha estado conmigo en cada paso que doy, otorgándome fortaleza, sabiduría y guiándome por el camino correcto para culminar con éxito y satisfacción la etapa de mi vida universitaria.

A la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja; en especial, al personal directivo, administrativo y docentes que forman parte de la carrera de Ingeniería Agronómica por haberme brindado toda su colaboración e impartido sus conocimientos, lo cual ha permitido que me forme de manera íntegra, en el ámbito personal y profesional.

Al Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute *PhD*, director de trabajo de titulación, quien me guio y asesoro con tenacidad e integridad a través de sus abundantes conocimientos para culminar un trabajo exitoso.

Gabriela Marisol Jiménez Jiménez

Índice de contenidos

| | |
|--|------|
| Portada | i |
| Certificación | ii |
| Autoría | iii |
| Carta de autorización | iv |
| Dedicatoria | v |
| Agradecimiento | vi |
| Índice de contenidos | vii |
| Índice de Tablas | xi |
| Índice de Figuras..... | xii |
| Índice de Anexos..... | xiii |
| 1. Título | 1 |
| 2. Resumen | 2 |
| 2.1. Abstract..... | 3 |
| 3. Introducción | 4 |
| 3.1. Objetivo general | 6 |
| 3.2. Objetivos específicos | 6 |
| 4. Marco teórico | 7 |
| 4.1. Origen del cultivo de Quinoa..... | 7 |
| 4.2. Clasificación Taxonomía..... | 7 |
| 4.3. Características morfológicas del cultivo de quinoa..... | 7 |
| 4.3.1. Raíz..... | 7 |
| 4.3.2. Tallo | 8 |
| 4.3.3. Hojas..... | 8 |
| 4.3.4. Inflorescencias..... | 8 |
| 4.3.5. Flores..... | 9 |
| 4.3.6. Frutos..... | 9 |
| 4.3.7. Semilla..... | 9 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.4. | Importancia nutricional..... | 9 |
| 4.4.1. | Proteínas | 10 |
| 4.4.2. | Grasas | 10 |
| 4.4.3. | Carbohidratos | 10 |
| 4.4.4. | Minerales | 10 |
| 4.4.5. | Vitaminas | 11 |
| 4.5. | Importancia agronómica | 11 |
| 4.6. | Requerimientos climáticos y edáficos de la quinua..... | 11 |
| 4.7. | Fenología de la quinua..... | 13 |
| 4.8. | Generación del rendimiento en quinua..... | 15 |
| 4.9. | Componentes del rendimiento | 15 |
| 4.9.1. | Número de granos | 16 |
| 4.9.2. | Peso de granos | 16 |
| 4.10. | Nutrición de la quinua..... | 16 |
| 4.11. | Requerimientos nutricionales..... | 16 |
| 4.11.1. | Estrategias de fertilización..... | 19 |
| 4.12. | Diagnóstico de la fertilización nitrogenada mediante análisis de plantas..... | 19 |
| 4.13. | Curva de dilución del nitrógeno..... | 20 |
| 4.13.1. | Determinación de la curva de dilución de nitrógeno | 20 |
| 5. | Metodología | 22 |
| 5.1. | Condiciones geográficas del área de estudio | 22 |
| 5.2. | Manejo del cultivo | 22 |
| 5.3. | Diseño experimental | 22 |
| 5.4. | Metodología para el primer objetivo | 23 |
| 5.4.1. | Fenología..... | 23 |
| 5.4.2. | Altura de planta | 24 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.4.3. | Dinámica de crecimiento del tallo..... | 24 |
| 5.4.4. | La tasa de elongación del tallo | 24 |
| 5.4.5. | Porcentaje de cobertura vegetal..... | 24 |
| 5.4.6. | Determinación de biomasa y concentración de nitrógeno total en plantas | 25 |
| 5.4.7. | Acumulación de nitrógeno en las plantas..... | 25 |
| 5.4.8. | Desarrollo de la curva de dilución de nitrógeno | 25 |
| 5.4.9. | El índice de nutrición de nitrógeno (INN) | 26 |
| 5.5. | Metodología para el segundo objetivo..... | 26 |
| 5.5.1. | Evaluación del rendimiento y sus componentes. | 26 |
| 5.5.2. | Biomasa aérea e Índice de cosecha (IC)..... | 26 |
| 5.5.3. | Eficiencia del uso de nutrientes (EUN) para nitrógeno..... | 27 |
| 5.6. | Análisis estadístico | 27 |
| 6. | Resultados | 28 |
| 6.1. | Fenología del cultivo y condiciones climáticas | 28 |
| 6.2. | Dinámica del crecimiento del tallo | 29 |
| 6.3. | Tasa de elongación del tallo | 30 |
| 6.4. | Cobertura vegetal..... | 30 |
| 6.5. | Determinación de biomasa y concentración de nitrógeno total en plantas..... | 31 |
| 6.6. | Acumulación de nitrógeno en las plantas | 31 |
| 6.7. | Desarrollo de la curva de dilución de nitrógeno..... | 32 |
| 6.8. | Índice de nutrición de nitrógeno (INN) | 33 |
| 6.9. | Rendimiento y sus componentes | 33 |
| 6.10. | Eficiencia agronómica del uso de nitrógeno | 34 |
| 6.11. | Correlaciones entre las variables de estudio. | 35 |
| 7. | Discusión | 36 |
| 8. | Conclusiones | 39 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 9. Recomendaciones | 40 |
| 10. Bibliografía | 41 |
| 11. Anexos | 46 |

Índice de tablas:

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación taxonómica de la quinua..... | 7 |
| Tabla 2. Tratamientos aplicados en la investigación..... | 23 |
| Tabla 3. Etapas de crecimiento fenológico de la quinua (<i>Chenopodium quinoa</i> Willd.) basadas en la escala BBCH..... | 24 |
| Tabla 4. Medias de rendimiento de grano, sus componentes, índice de cosecha de quinua var. Tunkahuan con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada..... | 34 |
| Tabla 5. Correlaciones entre las variables de estudio en el cultivo de quinua var. Tunkahuan | 35 |
| Tabla 7. Fenología del cultivo de quinua var. Tunkahuan en condiciones de La Argelia, parroquia Punzará, cantón Loja de la provincia Loja..... | 51 |

Índice de figuras:

| | |
|---|----|
| Figura 1. Distribución de los tratamientos en el campo..... | 22 |
| Figura 2. Temperatura media, humedad relativa registrada durante el ciclo de cultivo quinua var. Tunkahuan, triángulos azules hacia abajo indican la escala fenológica en BBCH desde la siembra hasta senescencia..... | 28 |
| Figura 3. Duración de las etapas fenológicas de quinua var. Tunkahuan, en función de días después de la siembra (eje x superior) y acumulación térmica grados/días °Cd (eje x inferior). Verde: Emergencia de cotiledones (BBCH 9); Rojo: Brotes laterales (BBCH 20); Azul: Emergencia de inflorescencia (BBCH 50); Morado: Antesis (BBCH 60); Amarillo: Desarrollo del fruto (BBCH 70); Café: Senescencia (BBCH 91). Los números en las flechas azules representan las fases según la escala BBCH. | 29 |
| Figura 4. Dinámica de crecimiento del tallo de las plantas de quinua var. Tunkahuan con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada..... | 29 |
| Figura 5. Tasa de elongación del tallo de las plantas de quinua var. Tunkahuan indica cuantos cm creció cada día con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada..... | 30 |
| Figura 6. Cobertura vegetal (%) de quinua var. Tunkahuan en función de los días después de la siembra con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada..... | 30 |
| Figura 7. Biomasa aérea y acumulación de nitrógeno, a) biomasa seca acumulada ($T ha^{-1}$) de las plantas de quinua durante el ciclo del cultivo; b) acumulación de N en los brotes N ($g N g^{-1} MS^{-1} \times 100$) en función de los días después de la siembra de quinua var. Tunkahuan con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada. | 31 |
| Figura 8. Acumulación de nitrógeno en la planta de quinua ($g de N m^{-2}$) en función de los días después de la siembra de quinua var. Tunkahuan con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada. | 32 |
| Figura 9. Puntos críticos de datos de nitrógeno (N) utilizados para definir la curva de dilución crítica de N, que describe la concentración crítica de N en quinua var. Tunkahuan. | 32 |
| Figura 10. Índice de nutrición de nitrógeno (NNI) de quinua var. Tunkahuan en las diferentes dosis de aplicación de N y etapas de crecimiento, línea vertical indica el inicio del estado de antesis | 33 |

Índice de anexos:

| | |
|--|----|
| Anexo 1. Análisis del suelo..... | 46 |
| Anexo 2. Plan de fertilización..... | 48 |
| Anexo 3. Fenología del cultivo de quinua var. Tunkahuan | 51 |
| Anexo 4. Evidencias fotográficas | 53 |
| Anexo 5. Certificación de traducción del resumen | 57 |

1. Título

“Desarrollo de la curva crítica de dilución del nitrógeno para quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el sector La Argelia, Loja”.

2. Resumen

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) ha adquirido creciente interés mundial por su alto valor nutricional y capacidad de adaptación a diferentes zonas agroecológicas. El rendimiento es afectado por múltiples factores genotipo, ambiente y manejo agronómico, las herramientas de diagnóstico de la deficiencia de nitrógeno en plantas pueden basarse en el concepto de curva crítica de dilución del nitrógeno que describen la planta, es importante para optimizar el manejo de la fertilización del nitrógeno para aumentar el rendimiento y minimizar los efectos por exceso de fertilizante, en quinua no se ha determinado. El objetivo de la presente investigación es determinar la curva de dilución crítica de nitrógeno para un genotipo de quinua en condiciones agroclimáticas de Loja. Se evaluó tres repeticiones de cada tratamiento (0, 50, 100, 200 y 300 Kg N ha⁻¹) se aplicó en dos etapas; la primera recibió 10 Kg N ha⁻¹ en el estado de cuatro a seis hojas (BBCH14-16), la segunda con el resto de N en la etapa de brotes laterales (BBCH20) excepto para control. Como resultado los tratamientos no influyeron en las variables de crecimiento del tallo, la tasa de elongación, cobertura vegetal, biomasa y concentración de N en las plantas, la acumulación de N fue 10,93 g de N m⁻² y la curva de dilución crítica $N_c = 4,25 * W^{-0,41}$. El tratamiento N200 influyo en el rendimiento dando 4 988 kg ha⁻¹, la dosis optima de N fue 90 kg N ha⁻¹ con un rendimiento de 4,5 t ha⁻¹.

Palabras claves: Quinoa, índice de nutrición nitrogenada, curva de dilución de nitrógeno, eficiencia agronómica para rendimiento, acumulación de nitrógeno en las plantas.

2.1. Abstract

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) has gained increasing interest worldwide for its high nutritional value and ability to adapt to different agroecological zones. Yield is affected by multiple factors genotype, environment and agronomic management, diagnostic tools for nitrogen deficiency in plants can be based on the concept of critical nitrogen dilution curve described by the plant, it is important to optimize the management of nitrogen fertilization to increase yield and minimize the effects of excess fertilizer, in quinoa has not been determined. The objective of this research is to determine the critical nitrogen dilution curve for a quinoa genotype under agroclimatic conditions of Loja. Three replicates of each treatment (0, 50, 100, 200 and 300 kg N ha⁻¹) were applied in two stages; the first received 10 kg N ha⁻¹ at the four to six leaves stage (BBCH14-16), the second with the rest of N at the lateral bud stage (BBCH20) except for control. Como resultado los tratamientos no influyeron en las variables de crecimiento del tallo, la tasa de elongación, cobertura vegetal, biomasa y concentración de N en las plantas, la acumulación de N fue 10,93 g de N m⁻² y la curva de dilución crítica $N_c = 4,25 * W^{-0,41}$. The N200 treatment influenced yield by 4,988 kg ha⁻¹, the optimum N dose was 90 kg N ha⁻¹ with a yield of 4.5 t ha⁻¹.

Keywords: Quinoa, nitrogen nutrition index, nitrogen dilution curve, agronomic efficiency for yield, nitrogen accumulation in plants.

3. Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un grano ancestral de más de 5 000 años de antigüedad, originario de Sudamérica, cultivado y utilizado como alimento básico por las culturas precolombinas andinas y reemplazada por otros cultivos con la llegada de los españoles (Gómez y Aguilar, 2016). Se extendió por la región andina, siendo Bolivia y Perú los principales productores, Perú representa el 53% del volumen producido, seguido por Bolivia con el 44% y Ecuador 2,7% (Montero y Romero, 2017). Los patrones de consumo cambiante y la creciente conciencia sobre la salud y el medio ambiente están dando una mayor demanda de semillas de quinua especialmente en países europeos (Gomez y Aguilar, 2016; Mordor Intelligence, 2022).

La quinua se constituye en un cultivo estratégico que ha ganado un creciente interés en Europa y América del Norte pues contribuye a la seguridad alimentaria por su amplia variabilidad genética, potencial agrícola y calidad nutricional, por sus altas concentraciones de proteína que varía entre 13,81 y 21,9%, todos los aminoácidos esenciales, carbohidratos, ácidos grasos de alta calidad, índice glucémico bajo, vitaminas y minerales, libre de gluten (Alandia et al., 2020; Bravo et al., 2022). Asimismo, por su adaptabilidad a condiciones climáticas adversas, de suelo, pH extremo, sequías, heladas, alta radiación solar, resistente a factores fitosanitarios (Hinojosa et al., 2018), de ahí que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) decidió llamar el año 2013 como el año internacional de la quinua.

En Ecuador la mayor productividad se desarrolla en las provincias de la sierra Carchi, Imbabura, Pichincha, Chimborazo, Cañar y Loja por pequeños agricultores, pero sus rendimientos varían entre 0,85 y 1,5 t ha⁻¹ (Peralta et al., 2014) son muy bajos considerando el rendimiento potencial máximo de 11 t ha⁻¹ (MAG, 2013). La producción del cultivo de quinua esta regulada por varios factores entre ellos, el genotipo, ambiente (temperatura, precipitación, viento, radiación solar, fertilidad del suelo, disponibilidad hídrica, entre otros), biológicas (presencia de plagas y enfermedades) y manejo agronómico (Gonzales y Prado, 2013), así mismo en Ecuador la quinua es sembrada en suelos con bajos contenidos de nutrientes sin recibir fertilización (Peralta et al., 2014). Por ello la nutrición del cultivo se constituye en un factor crítico para los bajos rendimientos, considerando el rendimiento del cultivo frente a la fertilización nitrogenada (Tapia y Fries, 2007).

Entre los nutrientes, el nitrógeno (N) es uno de los elementos más importante para la producción de cultivos de granos, es un componente fundamental de la estructura de proteínas, enzimas,

ácidos nucleicos y de la molécula de clorofila, por lo tanto, el N está implicado en los procesos de crecimiento y senescencia foliar, la capacidad fotosintética de la planta, determinando el rendimiento y sus componentes (Mejia y Menjivar, 2010). El N genera la cobertura mediante la expansión foliar, por ello deficiencias durante la etapa vegetativa temprana reduce el crecimiento y rendimiento, mientras que las deficiencias posteriores afectan el número y peso de los granos (Connor y Sadras, 1992).

La deficiencia de N es el trastorno nutricional que restringe el rendimiento de los cultivos, pues el uso eficiente de N en la producción es crucial para aumentar el rendimiento, la calidad y rentabilidad de los cultivos (Mendoza et al., 2016). Kaul et al. (2005) y Mendoza et al. (2016) encontraron que la quinua requiere un importante aporte de N para incrementar el rendimiento y calidad del grano. De ahí la importancia de conocer los requerimientos nutricionales mediante los métodos de diagnósticos de deficiencias de nitrógeno.

Los métodos de diagnóstico de la deficiencia de N basados en plantas podrían usarse para un diagnóstico a priori destinado a optimizar el manejo de la fertilización, para aumentar el rendimiento económico de la quinua y minimizar los efectos negativos por exceso de fertilizantes (Ziadi et al., 2010; García y Correndo, 2016). Entre ellos está el diagnóstico a priori del estado de la planta, consiste en la detección temprana de deficiencia de N para determinar la necesidad de aplicar fertilizante adicional, también se diagnostica a posteriori para la detección de factores limitantes para los cultivos. Estos métodos pueden basarse en la definición de una concentración crítica de N (N_c) es decir la concentración mínima de N requerida para el crecimiento máximo (Greenwood, 2001). Además, permiten la aplicación de la “fuente” correcta de nutrientes en la “dosis, momento, y forma” correcta (García y Correndo, 2016).

Un indicador útil para la detección de deficiencias tempranas de N es el Índice de Nutrición Nitrogenada (INN) (Lemaire et al., 2008), se calcula como el cociente entre la concentración de N en el cultivo y la concentración crítica estimada a partir de la materia seca. La concentración crítica de N (N_c) en toda la planta fue desarrollada por Lemaire y Salette (1984) para la festuca alta (*Festuca arundinacea Schreb.*), permite alcanzar la máxima tasa de crecimiento varía en función de la biomasa, porque a medida que ésta aumenta, la proporción del N disminuye por efecto de su dilución en la biomasa aérea incrementada. Representada por una ecuación alométrica que vincula el N consumido por la planta y la materia seca acumulada, a partir de esta ecuación se obtiene la curva de dilución nitrogenada (CDN), únicas para diferentes genotipos de una especie o para un grupo de especies (Lemaire y Gastal, 1997).

Hasta la actualidad, existen escasa información sobre la concentración crítica del nitrógeno en quinua, y se ha usado de manera general la curva de dilución del nitrógeno desarrollada para las especies C3 propuesta por Greenwood (1990), varios autores indican que cada especie tiene su propia curva de dilución de nitrógeno de acuerdo a sus características histológicas y morfológicas (Justes, 1994), como se ha visto en otras especies donde estas curvas pueden ser únicas para diferentes genotipos de una misma especie (Zaidi, et al., 2010), de manera que en la quinua es posible que el nivel crítico de N sea distinto entre genotipos y por la plasticidad fenotípica que presenta.

3.1. Objetivo general

Determinar la curva de dilución crítica de nitrógeno para un genotipo de quinua andino en condiciones agroclimáticas de Loja.

3.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar la concentración y acumulación de nitrógeno en la biomasa vegetal durante el crecimiento de la quinua bajo diferentes dosis de fertilización nitrogenada.
- ✓ Evaluar el rendimiento y sus componentes de la quinua cultivada con diferentes dosis de fertilización nitrogenada.

4. Marco teórico

4.1. Origen del cultivo de Quinoa

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) fue cultivada y utilizada por las civilizaciones prehispánicas Lupaka e Inca, hace 3 000 a 5 000 años y reemplazada por los cereales a la llegada de los españoles (Rojas, 2021). Ha sido descrita por primera vez en sus aspectos botánicos por Carl Ludwig Willdenow en 1778, como una especie nativa de Sudamérica, cuyo centro de origen, según Bukasov se encuentra en los Andes de Bolivia y Perú (Jellen et al., 2014)

La distribución geográfica de la quinoa se extiende por los países de la región andina desde los 5° Latitud Norte al sur de Colombia, al norte de Argentina, hasta 43° Latitud sur de Chile.

Debido a la existencia de adaptaciones particulares de esta especie a ciertas zonas geográficas a lo largo de Los Andes, se reconocen cinco ecotipos que corresponden a: quinoa de los valles interandinos (Colombia, Ecuador y Perú), quinoa del altiplano (Perú y Bolivia), quinoa de las Yungas (Bolivia), quinoa de los salares (Bolivia, Chile y Argentina), y quinoa de la costa o de nivel del mar (Chile y Argentina) (Bazile et al., 2015)

4.2. Clasificación Taxonomía

La quinoa es catalogada por la APG, de la siguiente manera (FAO, 2011)

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la quinoa.

| Reino | <i>Plantae</i> |
|-----------------|--------------------------------------|
| División | <i>Magnoliophyta</i> |
| Clase | <i>Magnoliopsida</i> |
| Orden | <i>Caryophyllales</i> |
| Familia | <i>Amaranthaceae</i> |
| Subfamilia | <i>Chenopodioideae</i> |
| Genero | <i>Chenopodium</i> |
| Especie | <i>Chenopodium quinoa</i> Willdenow. |
| Nombres comunes | Quinoa, Quinoa, Quínoa. |

Fuente: (FAO, 2011)

4.3. Características morfológicas del cultivo de quinoa

4.3.1. Raíz

Es pivotante de la cual emergen raíces secundarias y terciarias, ramificada y fibrosa, la longitud de la raíz se relaciona con la altura de la planta, variando de 0.8 a 1. Su desarrollo y crecimiento

está determinado por el genotipo, tipo de suelos, nutrición y humedad entre otros factores (Gómez y Aguilar, 2016).

4.3.2. Tallo

Es cilíndrico en la unión del cuello con la raíz y angular donde emergen las ramas y hojas, es de tipo herbáceo, erecto, glabro (Aguirre , 2018), las ramificaciones y altura dependen del genotipo, variedad, densidad de siembra y disponibilidad de nutrientes, siendo las variedades de los ecotipos de valle más altas (Gómez y Aguilar, 2016).

En floración el color básico del tallo puede ser verde, amarillo, naranja, rojo o verde con estrías verticales de otra coloración y las axilas de las hojas y ramas pueden ser del mismo color del tallo o diferente, a la madurez el tallo, se torna crema o rosado con diferentes intensidades (Gómez y Aguilar, 2016).

4.3.3. Hojas

Son simples, opuestas o alternadas, penninervias, márgenes enteros o dentados (Aguirre, 2018), el peciolo es acanalado y largo, son más largos los del tallo y más cortos en las ramas. Las láminas son más grandes en el follaje y más pequeñas en la inflorescencia, son polimórficas en la misma planta, las hojas basales pueden ser romboidales o triangulares y alrededor de la panoja lanceoladas, el color puede ser verde, rojo o púrpura con diferentes tonalidades (FAO, 2011; Gómez y Aguilar, 2016).

Las láminas de las hojas, tallos e inflorescencias jóvenes están cubiertas de una pubescencia vesicular, rica en cristales de oxalato de calcio que pueden ser de color blanco, rojo o púrpura, estos cristales absorben agua del medio ambiente e incrementan la humedad relativa de la atmósfera que rodea las hojas y consecuentemente, disminuye la transpiración (FAO, 2011).

4.3.4. Inflorescencias

Es globular o elongada, densamente bracteada, los glomérulos forman una panoja, que se encuentra en el ápice de la planta y en el ápice de las ramas, tiene un eje central, secundarios, terciarios y pedicelos que sostienen a los glomérulos (grupos de flores), por la disposición de las flores y por qué el eje principal está más desarrollado que los secundarios, puede ser una inflorescencia laxa, intermedia o compacta de diversos colores. La longitud varía de 0,15 a 0,70 m (FAO, 2011).

4.3.5. Flores

Son pequeñas, sésiles, carecen de pétalos, misma coloración que los sépalos, la quinua es una planta ginomonoica, tiene flores hermafroditas y pistiladas (femeninas) en la misma inflorescencia, se ubican en grupos formando glomérulos, en el ápice del glomérulo se localizan las flores hermafroditas y alrededor de ellas las flores pistiladas. La proporción de flores hermafroditas y pistiladas es variable (FAO, 2011; Gómez y Aguilar, 2016).

4.3.6. Frutos

Es un aquenio de forma lenticular, elipsoidal, ensanchado hacia el centro, la zona ventral del aquenio tiene una cicatriz que es la inserción del fruto en el receptáculo floral (Mujica & Canahua, 1989), está cubierto por el perigonio, le da color al fruto, está constituido por el pericarpio (capa del fruto) y la semilla, el pericarpio está adherido a la capa de la semilla tiene alveolos en su superficie y la saponina que se encuentra pegada al perigonio le da el sabor amargo al grano, el fruto puede alcanzar un diámetro de 1.5 a 3 mm (Gómez y Aguilar, 2016).

4.3.7. Semilla

Formado por epispermo, embrión y perisperma, el epispermo, es la capa que cubre la semilla y está adherida al pericarpio, su color puede ser diferente en la misma semilla. El embrión está formado por dos cotiledones y la radícula, representa el 30% del peso del grano y envuelve al perisperma como un anillo, la radícula, muestra una pigmentación castaño oscuro. El perisperma es el tejido de reserva de los almidones y otros nutrientes del grano, es de color blanquecino y representa el 60% de la semilla, contiene el 6.3 al 8.3 % de proteína total del grano (Gómez y Aguilar, 2016)

4.4. Importancia nutricional

Según la FAO (2011) la quinua es considerada como el único alimento del reino vegetal que provee todos los aminoácidos esenciales, que se encuentran cerca de los estándares de nutrición humana establecidos por la FAO. Es considerado así por sus componentes, proteína de alta calidad ya que contiene 16 de los 24 aminoácidos esenciales, carbohidratos, ácidos grasos de alta calidad (linoleico y linolenico), minerales (Ca, K, Fe, Mg, Mn, P) y vitaminas E, C (tocoferoles, riboflavina, tiamina) (González y Prado, 2013); además no tiene gluten, también posee un alto porcentaje de fibra dietética total que actúa como depurador del cuerpo, así elimina toxinas y residuos que dañan el organismo, se puede consumir el grano, las hojas y las inflorescencias que son ricas en vitaminas y minerales, especialmente en calcio, fósforo y

hierro. Los valores promedios de la composición de nutrientes de la quinua en proteína, grasa y ceniza son superiores a los cereales de trigo, arroz y maíz (González y Prado, 2013).

4.4.1. Proteínas

La quinua se caracteriza por la calidad de su proteína, por esta razón que su combinación es ideal para mejorar el valor nutricional de algunos alimentos, la calidad proteica esta compuesta por un buen balance de aminoácidos, considerándola como una proteína de alta calidad dado las cantidades importantes de metionina, lisina (4,8 g/100 g de proteína), y más aún la proporción de lisina, primer aminoácido limitante, es relativamente alta y treonina (3,7 g/100 g de proteína) (FAO, 2011).

Se observa que las proteínas de la quinua tienen concentraciones más altas o adecuadas de los aminoácidos esenciales, además, puede satisfacer los requerimientos de fenilalanina, tirosina, histidina, isoleucina, treonina y valina para niños de entre 10 a 12 años (González y Prado, 2013).

4.4.2. Grasas

El contenido de grasa es mayor que en otros cereales, del contenido de grasa total, aproximadamente el 0,7% corresponde a ácidos grasos saturados, el 1,6% a monoinsaturados y el contenido de ácidos grasos poliinsaturados alcanza el 3,3%, es una fuente rica de ácidos grasos esenciales, como es el Omega 6 (ácido linoleico), 50,24% para quinua, el Omega 9 (ácido oleico) 26,04% para aceite de quinua, para el Omega 3 (ácido linolénico) es de 4,77%, seguido del ácido palmítico con 9,59% (González y Prado, 2013).

4.4.3. Carbohidratos

En general, el contenido de hidratos de carbono es del orden de 64-71%. El almidón se encuentra ampliamente distribuido en diferentes órganos de la planta como carbohidrato de reserva. Es el componente más abundante del grano (55-65%) y una fuente importante de carbohidratos para la alimentación humana. El contenido de amilosa es menor que otros cereales, del orden del 11%. Los otros carbohidratos se encuentran en menores cantidades, tales como monosacáridos 2%, disacáridos 2,3-2,6% y fibra cruda se aproxima a 3-8% (González y Prado, 2013).

4.4.4. Minerales

En la quinua los minerales que se destacan es el potasio (9,8 g/kg), calcio (707,9 mg/kg), magnesio (1384,6 mg/kg) y zinc cuyo valor resulta superior al encontrado en otros cereales.

También el valor detectado de hierro resulta el doble que el informado para arroz (González y Prado, 2013).

4.4.5. Vitaminas

La quinua es también una fuente importante de vitamina E (γ tocoferoles) y esto es de particular relevancia ya que esta vitamina tiene una fuerte relación con la actividad anti carcinógena y antiinflamatoria. También se ha informado contenidos importantes de riboflavina, tiamina y especialmente vitamina C, que no son comunes en los cereales clásicos (González y Prado, 2013).

4.5. Importancia agronómica

La quinua se le considera una especie con alta variabilidad genética que le proporciona una amplia gama de colores de plantas, inflorescencias y semillas, alto valor nutritivo y saponina de los grano, también tiene una alta adaptabilidad agroecológica tolerando diversas y extremas condiciones ambientales como largos periodos de sequía, salinidad, heladas, altos niveles de radiación solar y a factores fitosanitarios, por estas características ha sido considerada de gran importancia agronómica y como una alternativa para contribuir a la seguridad alimentaria mundial, en zonas donde la población tiene limitaciones ambientales para producir cultivos, en la agroindustria y a la economía de la agricultura familiar (González y Prado, 2013).

4.6. Requerimientos climáticos y edáficos de la quinua

Altitud

Por su amplia variabilidad genética se adapta a varios pisos altitudinales desde el nivel del mar o costa (0 – 500 m.s.n.m.), bosques andinos (500 – 2500 m.s.n.m.); valles interandinos (2500 – 3500 m.s.n.m.) y hasta el Altiplano (3500 a 4000 m.s.n.m.) (Mendoza et al., 2016; Gómez y Aguilar, 2016), sin embargo la altitud óptima alrededor de los 2 400 a los 3 200 msnm.

Precipitación

Se cultiva dentro de un rango de precipitación de 300 mm a 1000 mm, siendo las óptima de 500 a 800 mm (Peralta, 2014; Gómez y Aguilar, 2016).

Temperatura

Se adapta a diferentes climas desde calurosos, secos, lluviosos, heladas, pero la temperatura media óptima está alrededor de 15–25 °C, sin embargo, soporta temperaturas extremas desde 38–8 °C (Mendoza et al., 2016)

Humedad

Crece desde el 40% en el altiplano hasta el 100% de humedad relativa en la costa (Gómez y Aguilar, 2016).

Fotoperiodo

Por su amplia variabilidad genética y gran plasticidad, presenta genotipos de días cortos, de días largos e incluso indiferentes al fotoperíodo, se adaptan a las condiciones de luminosidad, las variedades del trópico son más sensibles al fotoperiodo y por una larga fase hasta antesis, las variedades del Altiplano y de nivel de mar son de menor sensibilidad al fotoperiodo y tienen una fase a antesis más corta (Gómez y Aguilar, 2016).

Suelos

Se adapta a diferentes tipos de suelos franco arenosos, franco arcillosos, siempre que tenga nutrientes y no exista encharcamiento de agua porque es susceptible al exceso de humedad sobre todo en los primeros estados, prefiere suelos francos, con buen drenaje y alto contenido de materia orgánica, con pendientes moderadas y un contenido medio de nutrientes, es exigente en nitrógeno y calcio, moderadamente en fósforo y poco de potasio, también se desarrolla en suelos neutros, alcalinos (hasta pH 9) y ácidos (hasta pH 4.5) (Mendoza et al., 2016).

Siembra

La siembra debe ser inmediata concluida la preparación del suelo, así las semillas dispondrán de humedad adecuada y se reducirá la competencia con arvenses, se puede sembrar en forme directa o por trasplante, la cantidad de semilla que se utiliza para en las zonas de altiplano es de 15 a 20 kg ha⁻¹, durante el establecimiento del cultivo, entre el 0 y 50% de las semillas se perderán por una serie de factores poca profundidad de siembra, muy cubiertas con el suelo, alta radiación solar etc., la población definitiva del campo se define después del desahíje o raleo (Gómez y Aguilar, 2016).

4.7. Fenología de la quinua

Sosa *et al.*, (2017) describe las etapas fenológicas de crecimiento de la quinua basándose en el sistema de codificación BBCH.

Etapas principales de crecimiento 0: germinación

Describe la germinación de la semilla hasta que los cotiledones emergen de la superficie del suelo, se incluyeron etapas secundarias como inicio de la imbibición de la semilla (estadio 01), imbibición completada (estadio 03) y la emergencia de la radícula de la semilla (estadio 05), emergencia del hipocótilo (estadio 07) y el hipocótilo con los cotiledones crecen hacia la superficie (estadio 08). Finaliza con la emergencia de los cotiledones a través de la superficie del suelo (estadio 09).

Etapas principales de crecimiento 1: desarrollo de la hoja

Describe la emergencia de las hojas fotosintéticas en el brote principal. Las hojas emergieron en pares, considerando visibles un par de hojas cuando los dos limbos de las hojas se separarán entre sí. Esta etapa inicia cuando los cotiledones se separaron entre ellos (estadio 10) y la aparición de las hojas fotosintéticas en el brote principal determina la etapa de crecimiento secundario. El primer par de hojas fotosintéticas es el estadio 11 seguido del estadio 12 y sucesivamente.

Etapas principales de crecimiento 2: formación de brotes laterales (sistemas secundarios)

Describe la formación de los brotes laterales en la quinua, la aparición de brotes laterales puede iniciar antes o después de la emergencia de la inflorescencia, depende del genotipo, se considera un brote lateral cuando muestra un cm o más de longitud. El primer brote lateral se codifica como estadio 21, el segundo brote lateral estadio 22 y así sucesivamente.

Etapas principales de crecimiento 3: elongación del tallo

Etapas principales de crecimiento 4: desarrollo de partes vegetativas cosechables

Etapas principales de crecimiento 5: emergencia de la inflorescencia

Describe cualitativamente el desarrollo de la inflorescencia en el tallo principal. La inflorescencia aparece antes de terminar la etapa de desarrollo de las hojas en el tallo principal (estadio 1). Al principio, las yemas de la inflorescencia están cubiertas por hojas jóvenes y no son visibles (estadio 50). Después del alargamiento de las hojas, la inflorescencia se hace visible

desde arriba (estadio 51). Finaliza cuando la inflorescencia queda sin hojas que la cubran, aun cuando todas sus flores siguen cerradas (etapa 59).

Etapa principal de crecimiento 6: floración

Describe el desarrollo de las flores dentro de la inflorescencia principal. La floración inicia al mostrar las primeras anteras (estadio 60). Después de la antesis le sigue el final temprano de la floración, que comienza con las primeras anteras senescentes de las flores principales de la inflorescencia (estadio 67). El color de la inflorescencia cambia según el genotipo, en el cual el color del perigonio cambia a medida que avanza la floración. Cuando todas las anteras visibles de la inflorescencia principal mueren se considera completada (estadio 69).

Etapa principal de crecimiento 7: desarrollo del fruto

Describe el desarrollo del fruto en el tallo principal. El desarrollo del fruto inicia con el cuajado de estos (estadio 70), que se definió como el engrosamiento del ovario y la presentación de los primeros granos visibles. El desarrollo del fruto en la quinua era visible, pero no se siguió el sistema de codificación BBCH que usa el porcentaje del diámetro final del grano, sabiendo que el diámetro final del aquenio de la quinua es de aproximadamente dos mm. Esta metodología de medición no fue factible para describir el resto de las etapas secundarias.

Etapa principal de crecimiento 8: maduración.

Describe la maduración de los granos. Durante el proceso de maduración, el contenido de agua del aquenio varía, modificando su textura y cambiando el color del pericarpio, que pasa de verde a beige, rojo o negro, en el que el grano se consideró lechoso (estadios 81), pastoso (etapa 85) y maduro (etapa 89). El estado lechoso es característico de los granos con pericarpio verde que se aplastan fácilmente con las uñas liberando un contenido de líquido blanco. Los granos pastosos, tienen un contenido blanquecino cuando son aplastados, y sus pericarpios son verdes, beige, rojos o negros. Los granos maduros son difíciles o imposibles de aplastar y tenían un contenido seco; sus pericarpios son de color beige, rojo o negro según sus genotipos, y estos granos están listos para ser cosechados.

Etapa principal de crecimiento 9: senescencia

Describe la senescencia de la planta después de la maduración del fruto. La senescencia comienza en las hojas basales (estadio 91) y continúa hacia arriba, pero el tallo permanece verde (estadio 93). Luego, las hojas basales mueren y el tallo pasa de amarillo a marrón (etapa 95). Finalmente, toda la planta está muerta y seca (etapa 97), y el producto es cosechado (etapa 99).

4.8. Generación del rendimiento en quinua

En los cultivos de grano el rendimiento generado puede ser explicado como una función directa de la producción de biomasa total (BT) y el índice de cosecha (IC). Un conjunto de factores que interactúan simultáneamente en la producción de biomasa, como I) la radiación solar incidente particular del área geográfica y estación del año, II) la eficiencia de intercepción determinada por la capacidad del conopeo para capturar la radiación solar incidente, y, III) la eficiencia de conversión o de uso de radiación que expresa la capacidad del cultivo de transformar la energía lumínica interceptada en biomasa (Andrade, 1995). La cantidad de radiación solar que se acumule dependerá de la longitud del ciclo del cultivo y de la dinámica con que éste capture dicha radiación (Satorre et al., 2015; Rojas, 2020)

El rendimiento se genera a lo largo del ciclo de cultivo y dependiendo de los factores que limiten su desarrollo y crecimiento se puede clasificarse en:

- I) rendimiento potencial, los factores limitantes son el genotipo, la temperatura, el fotoperíodo y la radiación solar, dichos factores no son controlados por el hombre
- II) rendimiento alcanzable, los factores limitantes son agua, suelo y nutrientes
- III) rendimiento logrado o real, los factores limitantes son las malezas, las enfermedades, las plagas y la contaminación (Villasuso, 2015).

Sandaña y Calderini (2012) mencionas que dependiendo de la incidencia de los factores mencionados, el total de recursos que se incorporan al sistema, se destina una parte a órganos vegetativos y sólo una proporción de la biomasa, representada por el IC, es lo que finalmente compone el rendimiento

4.9. Componentes del rendimiento

Espíndola (1980) citado por (Borda, 2011) define a los componentes de rendimiento como diversos caracteres de la planta que tienen influencia directa sobre la expresión del rendimiento, constituyen entidades orgánicas que cumplen una función biológica que es la producción de grano. Alcón (2005) citado por (Borda, 2011), señala que los componentes del rendimiento son descriptores de la población de plantas medidas en la cosecha, y que multiplicadas entre ellas se calcula el rendimiento. Los componentes del rendimiento se van generando durante el desarrollo del cultivo y cada uno es fijado en un momento específico, sus dos componentes principales son, el número de granos m^{-2} y el peso del grano (Satorre et al., 2015; Sandaña y Calderini, 2018).

4.9.1. Número de granos

Este componente se va generando a lo largo del ciclo del cultivo, este componente posee dos etapas, una etapa vegetativa en la cual se determina el número de plantas por unidad de superficie y el número de ramificaciones por planta, finalmente una etapa reproductiva en la cual se determina el número de panojas por planta y el número de granos por panoja (Satorre et al., 2015)

4.9.2. Peso de granos

El peso de grano depende de la tasa de acumulación de materia seca del grano (empieza luego de la fecundación, la evolución del peso de grano durante el periodo de llenado considera la dinámica de acumulación de materia seca) y del tiempo de llenado, comprende tres fases. La fase uno “lag” donde se produce la división celular acelerada y el incremento del peso es leve, la fase dos “de crecimiento lineal” donde hay una gran acumulación de biomasa y se definen los componentes comerciales, finalmente, la fase tres “de estabilidad” ya no hay acumulación de biomasa su peso se estabiliza alcanzando su máximo peso seco. Este componente en los cultivos de granos es mucho más estable que el número (Sandaña y Calderini, 2012).

4.10. Nutrición de la quinua

Del suelo las plantas obtienen todos los elementos necesarios para su crecimiento, a excepción del carbono y el oxígeno que lo obtienen del aire atmosférico. No existe suelo completamente deficiente; sin embargo, en ocasiones, los suelos son incapaces de suministrar todos los elementos nutritivos, en cantidad suficiente para un normal desarrollo de las plantas y por esta razón, hay que suplementar la reserva natural de los suelos mediante la fertilización, utilizando materiales orgánicos e inorgánicos (Sandaña y Calderini, 2012).

4.11. Requerimientos nutricionales

Para un buen crecimiento la quinua necesita muchos nutrientes, sobre todo macroelementos como el oxígeno, carbono, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. También necesita pequeñas cantidades de microelementos como hierro, boro, zinc, cobre, sodio, molibdeno, cloro, cobalto y sílice.

Nitrógeno

El nitrógeno es importante en la nutrición vegetal ya que forma parte de todas las proteínas y de moléculas importantes como las purinas, pirimidinas, ADN Y ARN. El nitrógeno se

encuentra también como constituyente de las clorofilas y enzimas del grupo de los citocromos, así como en varias coenzimas como el fosfato de piridoxal, el NAD y el NADP. Casi todas las plantas absorben nitrógeno durante todo su ciclo vegetativo, pero principalmente durante los periodos de crecimiento rápido, es un elemento esencial para la quinua, es uno de los que a menudo limita los rendimientos, este incrementa el crecimiento vegetativo y la capacidad fotosintética de la planta; es decir, determina el número de hojas, el número de semillas por inflorescencia y por lo tanto determina el potencial de rendimiento. Una importante cantidad del nitrógeno absorbido por la planta llega a los granos a la madurez y contribuye a la cantidad de proteína. calcio, magnesio y azufre (Mejia y Menjivar, 2010; Gómez y Aguilar, 2016)

Fósforo

El fósforo es esencial para la fotosíntesis, desempeña un gran papel en la síntesis proteica, en la biogénesis de los glúcidos, en la síntesis de las clorofilas y compuestos carotenoides, en la glucólisis y metabolismo de los ácidos orgánicos, y en la biosíntesis de los lípidos (Pérez, 2017).

La respuesta de la quinua al fósforo depende de la disponibilidad de fósforo soluble y el grado de fijación del fósforo adicionado al suelo. Cantidades significativas de fósforo pueden estar disponibles si los niveles de materia orgánica y el grado de mineralización son favorables. Es considerado un factor de precocidad, ya que activa el desarrollo inicial de los cultivos y favorece la maduración, este macronutriente es absorbido por la planta casi en su totalidad en las primeras fases de desarrollo, principalmente para la formación de un buen sistema radicular. La deficiencia de fósforo en las plantas de quinua se manifiesta en la reducción de la altura de las plantas, hojas de color verde muy oscuro o con un tono rojizo en los ápices de las hojas, retraso en la floración, retraso en la maduración, inflorescencias pequeñas y retorcidas, y granos muy pequeños o poco desarrollados (Gómez y Aguilar, 2016).

Potasio

El potasio es absorbido del suelo como ion K^+ , activa más de 60 enzimas, participa en la síntesis de carbohidratos y de proteínas, es imprescindible para algunas funciones fisiológicas como la formación y transformación del almidón, metabolismo del nitrógeno y síntesis de proteína, control y regulación de las actividades de varios elementos minerales esenciales, crecimiento de los tejidos meristemáticos y ajustes de la apertura de los estomas y mejora el régimen hídrico de la planta y aumenta su tolerancia a la sequía, heladas y salinidad.

La quinua absorbe potasio (K) en grandes cantidades, la mayor parte del potasio absorbido queda en el tallo, la deficiencia de potasio se manifiesta por un pobre crecimiento del sistema radicular, tallos débiles y hojas de la parte baja de la planta con bordes y ápices de color amarillo y secándose (Gómez y Aguilar, 2016).

Calcio

El calcio después del, potasio es el elemento básico más abundante que existe en las plantas. Una de sus principales funciones es la de ser parte de la estructura de la protopectina, como agente cementante para mantener las células unidas. También es importante para el desarrollo de las raíces, en las cuales ejerce una triple función: multiplicación celular, crecimiento celular y neutralización de los hidrogeniones. Asimismo, regula la absorción de nitrógeno; actúa sobre la translocación de los carbohidratos y proteínas en el interior de la planta; neutraliza los ácidos orgánicos que se originan en el metabolismo vegetal, tal cual ocurre con el ácido oxálico; y activa algunas 13 enzimas como la amilasa y la fosfolipasa (Pérez, 2017)

Hierro

El hierro puede ser absorbido por la planta mediante su sistema radicular como Fe^{2+} , o como quelatos de hierro. Interviene en muchos procesos vitales para la planta, formando parte de diversos sistemas enzimáticos, bien como un componente metálico específico de las enzimas, bien como uno de los varios metales igualmente necesarios para la actividad de las enzimas correspondientes (Pérez, 2017)

Manganeso

El manganeso es absorbido por la planta bajo la forma de Mn^{2+} y como quelato, tanto por su sistema radicular como por las hojas directamente. Interviene en el desarrollo de la clorofila y en los sistemas enzimáticos vegetales. Su diversidad de valencias le otorga capacidad para funcionar, ya sea como coenzima metálica, ya sea como parte integrante de una molécula orgánica (Pérez, 2017).

Zinc

El zinc es absorbido por la planta como Zn^{2+} , o como quelato por vía radicular o foliar. En ella, su movilidad no es grande, hallándose preferentemente acumulado en los tejidos de la raíz cuando encuentra un suministro adecuado en el suelo. Las funciones que el zinc realiza en la planta son variadas, en su gran mayoría son consecuencia de su participación en la formación y funcionamiento de diversos sistemas enzimáticos que intervienen en procesos vitales para la

planta, está estrechamente implicado en el metabolismo nitrogenado de las plantas (Pérez, 2017).

4.11.1. Estrategias de fertilización

Posiblemente la fertilización es el factor más importante en el aumento de la producción de los cultivos, ya que con su utilización se ha conseguido en los últimos 100 años, unos aumentos de producción que oscilan entre el 50 y el 60 por ciento (Feraris, 2016)

Se puede mejorar la disponibilidad de nitrógeno para la quinua a través de la rotación de cultivos que consisten en rotar con leguminosas como frijol, habas, arvejas bien establecidas y con alta nodulación que asegura disponibilidad de nitrógeno que puede ser empleado por la quinua, Después de papas conducidas con alta fertilización; los remanentes pueden ser empleados por la quinua, también se puede sembrar cultivos, para producir abono verde, que incrementan el contenido de materia orgánica o nitrógeno en la capa superficial y ayudan a retener mejor la humedad del suelo.

Para incrementar la disponibilidad de fósforo orgánico se puede emplear micorrizas de la raíz, aisladas de la quinua, que tienen una relación simbiótica con las raíces y pueden mejorar la absorción de nutrientes (Gómez y Aguilar, 2016).

4.12. Diagnóstico de la fertilización nitrogenada mediante análisis de plantas

Diagnosticar correctamente el estado nutricional de los cultivos es una condición necesaria para mejorar la eficiencia de utilización de los recursos e insumos, así mismo se busca un diagnóstico nutricional que permita la aplicación de la “fuente” correcta de nutrientes en la “dosis” correcta, en el “momento” correcto y en la “forma” correcta. Así se contribuirá de manera sostenible a la productividad de los cultivos y los sistemas manteniendo el equilibrio ambientales, económicos y sociales (García y Correndo, 2016).

El nitrógeno (N) es el nutriente más importante para la producción vegetal debido a las cantidades requeridas por los cultivos y a la frecuencia con que se observan deficiencias en suelos agrícolas. Por lo tanto, un diagnóstico de las necesidades de N de los cultivos permitirá aumentar el rendimiento, la calidad, rentabilidad de los cultivos, así como, la seguridad ambiental, reduciendo los impactos ambientales que se generan por aplicaciones excesivas (causando contaminación del suelo, aire y agua) y por aplicaciones deficientes (contribuyendo a degradación del suelo por disminución de las reservas naturales de N) (Fageria y Baligar, 2005).

Los métodos de diagnóstico, nutricional se basan en N en suelo y/o en planta y el requerimiento previsto para un determinado nivel de rendimiento, se tienen el siguiente método:

El diagnóstico de fertilización de N por análisis de plantas esta metodología integra los efectos de factores meteorológicos y edáficos sobre el estado nutricional del cultivo, determinando el contenido de los nutrientes en tejidos vegetales de plantas de un cultivo, muestreado en un momento o etapa de desarrollo determinados. Se basa en que la concentración de nutrientes en la planta está directamente relacionada con la habilidad del suelo para proporcionarlos y a su vez, con la productividad de las plantas, mediante esta técnica se puede: verificar síntomas de deficiencias nutricionales; identificar deficiencias asintomáticas (“hambre oculta”); indicar interacciones entre nutrientes; localizar zonas del lote que se comportan en forma diferente; y evaluar el manejo nutricional de los cultivos. Esta técnica comprende una secuencia de procedimientos: muestreo, análisis químico e interpretación (García y Correndo, 2016)

4.13. Curva de dilución del nitrógeno

Se sabe que el contenido de N en la planta decae durante el ciclo de crecimiento de los cultivos. Esto es debido a respuestas fisiológicas a situaciones como la posición de las hojas en la canopia y al aumento proporcional de tejidos estructurales y de almacenamiento a medida que transcurre el ciclo del cultivo (Lemaire et al., 2008). Lemaire y Salette (1984) introducen la idea de la relación entre el nitrógeno consumido por la planta y la materia seca acumulada y establecen una ecuación alométrica que vincula estas dos variables. A partir de esta ecuación se obtiene una curva donde cada punto representa la mínima concentración de N observada en planta para una determinada acumulación de biomasa aérea. Esta curva se denomina de dilución de nitrógeno (CDN).

4.13.1. Determinación de la curva de dilución de nitrógeno

Para estudiar el estado de nutrición con nitrógeno se utiliza el Índice de nutrición nitrogenada (INN), que relaciona el contenido de N experimental con el N crítico o teórico que debería contener la biomasa obtenida en una muestra. El INN se define como el contenido de N en la biomasa aérea de una planta relativo al mínimo contenido de N necesario para maximizar su crecimiento (N crítico, N_c). Este índice constituye una herramienta para determinar deficiencia o exceso de N en un cultivo (Lemaire et al., 2008).

El concepto de una curva de dilución crítica de N basada en la concentración de N de toda la planta fue desarrollado por Lemaire y Salette (1984) para festuca alta (*Festuca arundinacea* Schreb.) y está representado por una función alométrica:

$$N_c = aW^{-b}$$

Donde **W** es la biomasa total de los brotes, **N_c** es la concentración total de N en los brotes. **a** es la estimación de la concentración de nitrógeno en la biomasa total de brotes y **b** coeficiente de dilución descrito en la relación entre la concentración de N y la biomasa de los brotes.

5. Metodología

5.1. Condiciones geográficas del área de estudio

La presente investigación se desarrolló en la quinta experimental docente La Argelia (QEDA) de la Universidad Nacional de Loja, ubicada en el sector La Argelia, parroquia Punzará, cantón Loja de la provincia Loja. La QEDA se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas geográficas latitud: 4°02'19.2" S, longitud: 79°12'00.6" O. La zona de estudio se encuentra a 2 150 m.s.n.m, presenta una temperatura promedio de 18°C y una precipitación media anual de 1 058 mm.

5.2. Manejo del cultivo

Previo al establecimiento del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) se realizó un análisis químico (Anexo 1), que sirvió como base para elaborar un plan de fertilización y encalado (Anexo 2). Posteriormente se preparó el terreno con el paso de arado de disco y rastra; para finalmente delimitar las unidades experimentales siendo cada una de estas de 3m x 2m con una separación de 0,5 m entre estas (Figura 1). Para la siembra se utilizó la variedad Tunkahuan liberado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Ecuador (INIAP). Se realizó un raleo para conseguir una densidad uniforme, así mismo el cultivo se llevó bajo un manejo agronómico óptimo realizando control de las principales plagas y enfermedades, y malezas para asegurar las condiciones potenciales para el cultivo.

5.3. Diseño experimental

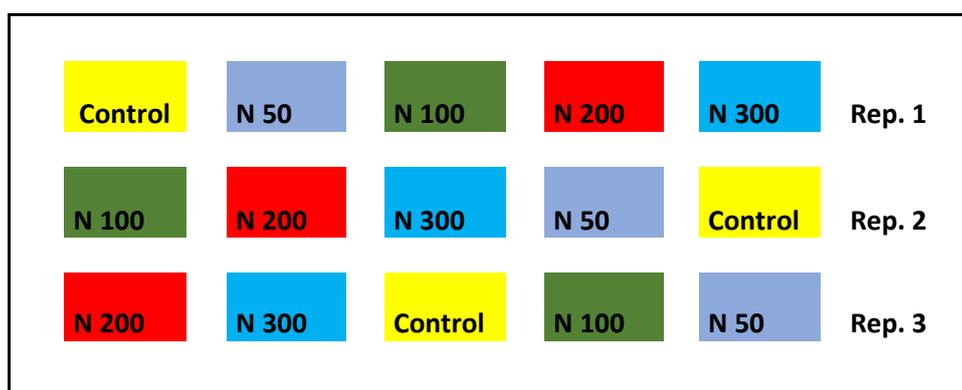


Figura 1. Distribución de los tratamientos en el campo

En esta investigación se estableció un diseño completamente al azar (DCA) (Figura 1), en base a cuatro tratamientos (T) previamente establecidos, basados en el análisis químico del suelo, se

corrigió pH y otros nutrientes para evitar limitaciones derivadas de estos (Anexo 2); los tratamientos fueron (0, 50, 100, 200 y 300 kg N ha⁻¹) para el Control T1, T2, T3 y T4 respectivamente (Tabla 2). Las aplicaciones de nitrógeno fueron en dos etapas; todos los tratamientos recibieron 10 Kg N ha⁻¹ aplicada al voleo superficial en el estado de cuatro a seis hojas (BBCH 14 - 16) y la segunda aplicación con el resto de nitrógeno en la etapa de brotes laterales (BBCH 20) excepto para el control. Cada tratamiento tuvo tres repeticiones y un control.

Tabla 2. Tratamientos aplicados en la investigación.

| Tratamiento | Dosis de fertilizante (kg ha ⁻¹) |
|-------------|---|
| Control | 0 |
| N50 | 50 |
| N100 | 100 |
| N200 | 200 |
| N300 | 300 |

5.4. Metodología para el primer objetivo

“Determinar la concentración y acumulación de nitrógeno en la biomasa vegetal durante el crecimiento de la quinua bajo diferentes dosis de fertilización nitrogenada”.

5.4.1. Fenología

Semanalmente se registró la fenología del cultivo, utilizando la escala BBCH para quinua elaborada por (Sosa et al., 2017) (Tabla 3) (Anexo 4). Cada etapa fenológica se estableció cuando más del 50 % de las plantas de la parcela alcanzó al estado fenológico objetivo. También se registró la duración de las etapas fenológicas para ello se cuantificó en días calendario, así como, en tiempo térmico para lo cual la temperatura acumulada se calculó como unidades de tiempo térmico (TT) mediante la sumatoria de la temperatura media usando una temperatura base de 1 °C (Bois et al., 2006):

$$TT (^{\circ}C d) = \sum n (Tm - Tb)$$

Donde, **TT** es el tiempo térmico **Tm** la temperatura media diaria y **Tb** la temperatura base y **n** el número de días. Con los datos de **TT** se cuantificará la duración de las etapas fenológicas en el cultivo.

Tabla 3. Etapas de crecimiento fenológico de la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) basadas en la escala BBCH.

| Código BBCH | Descripción |
|-------------|--|
| 0 | Geminación |
| 1 | Desarrollo de hojas |
| 2 | Formación de brotes laterales |
| 3 | Elongación del tallo |
| 4 | Desarrollo de órganos vegetativos de consumo |
| 5 | Emergencia de la inflorescencia |
| 6 | Floración |
| 7 | Desarrollo del fruto |
| 8 | Maduración |
| 9 | Senescencia |

Fuente: (Sosa *et al.*, 2017)

5.4.2. Altura de planta

Cada 15 días se registró la altura de tres plantas por cada unidad experimental, desde el cuello de la planta hasta el ápice central con un flexómetro.

5.4.3. Dinámica de crecimiento del tallo

Los valores de la altura se ajustaron a una función sigmoidea usando el software GraphPad Prism 8.01.

5.4.4. La tasa de elongación del tallo

Utilizando los datos de la altura de la planta se estimó la tasa de elongación del tallo usando la siguiente formula:

$$TET = \frac{AT_f - AT_i}{ND_f - ND_i}$$

Donde:

TET = tasa de elongación del tallo

AT = altura del tallo (f) final, (i) inicial

ND = número de día que se registró la altura (f) final, (i) inicial

5.4.5. Porcentaje de cobertura vegetal

Mediante el teléfono instalado la aplicación conopeo se tomó fotografías de las hileras centrales del cultivo a una distancia superior a 60 cm, dispuesto de forma paralela al suelo, esta aplicación cuantifica el porcentaje de cubierta vegetal verde viva en cada unidad experimental.

5.4.6. Determinación de biomasa y concentración de nitrógeno total en plantas

Para la biomasa ($t\ ha^{-1}$) se recolectó dos plantas por parcela iniciando desde la etapa 8 a 9 hojas verdaderas (BBCH 18 - 19) hasta antes del inicio de floración (BBCH 59), se cortó desde el cuello de la planta en intervalos de 10 a 13 días, la materia seca (MS) se determinó después de secar en estufa cada muestra a $65\ ^\circ C$ hasta llegar a peso constante. Las muestras fueron molidas y tamizadas (1 mm) y se almacenaron a temperatura ambiente hasta su posterior análisis químico (400g).

La concentración de nitrógeno total en las plantas se determinó mediante el método Kjeldahl (Bremner y Mulvancy, 1982).

5.4.7. Acumulación de nitrógeno en las plantas

El nitrógeno acumulado en las plantas (PNA) en cada estado de crecimiento se calculó usando la siguiente ecuación:

$$PNA = \frac{P_W L_N}{100}$$

Donde, P_W es el peso seco de las plantas, mientras que L_N son las concentraciones de N en las plantas.

5.4.8. Desarrollo de la curva de dilución de nitrógeno

Para la determinación de la curva crítica de N se identificó y seleccionó los datos anteriores obtenidos de la biomasa de brotes significativamente más alta ($P \leq 0.05$) obtenida con cualquier tasa de fertilización con N y la correspondiente concentración de N, se utilizó el procedimiento propuesto por (Greenwood et al., 1990 y Justes et al., 1994). Estos puntos de datos anteriormente seleccionados se utilizaron para determinar la relación entre la concentración crítica de N y la biomasa de los brotes utilizando una función alométrica.

$$N_c = aW^{-b}$$

Donde W es la biomasa total de los brotes expresados en mg de materia seca (MS) ha^{-1} , N_c es la concentración de N crítico en los brotes expresado en $g\ kg^{-1}\ MS$, y a y b son parámetros estimados. El parámetro a representa la concentración de nitrógeno en la biomasa total de brotes para $1\ mg\ MS\ ha^{-1}$, y el parámetro b representa el coeficiente de dilución descrito en la relación entre la concentración de N y la biomasa de los brotes, como se muestra en previos estudios (Ata-Ul-Karim, et al., 2013).

5.4.9. El índice de nutrición de nitrógeno (INN)

El índice de nutrición de N (INN) cuantifica el estado nutricional nitrogenado del cultivo, en cada fecha de muestreo se determinó dividiendo la concentración de N total de brotes (Nt) para la concentración de N crítico Nc , como se muestra en la siguiente ecuación.

$$INN = \frac{Nt}{Nc}$$

5.5. Metodología para el segundo objetivo

“Evaluar el rendimiento y sus componentes de la quinua cultivada con diferentes dosis de fertilización nitrogenada”.

5.5.1. Evaluación del rendimiento y sus componentes.

- ✓ En madurez de cosecha se colectó cinco plantas de 1 m de las hileras centrales de cada unidad experimental y se contabilizó el número granos obtenidos por planta.
- ✓ El número de granos por m^2 se estimó multiplicando el número de granos por planta por el número de plantas por m^2 .
- ✓ El peso de 1000 granos se determinó eligiendo al azar una muestra representativa de 1000 granos del total de granos cosechados en las plantas de los surcos centrales de cada unidad experimental, se secó en estufa a 65 ± 5 °C por 5 días. posterior a ello se pesó llevándolo a la balanza
- ✓ El rendimiento final de grano se obtuvo utilizando los componentes del rendimiento ya descritos, mediante la siguiente ecuación:

$$R = NG m^{-2} * PG$$

Donde:

R= rendimiento, **NG** m^{-2} = número de granos por metro cuadrado y **PG**= peso de granos

5.5.2. Biomasa aérea e Índice de cosecha (IC)

La biomasa aérea se obtuvo de plantas de las hileras centrales de 0,5 m para las muestras de biomasa se realizó en dos momentos en 1^{ra} antesis y a comienzos de llenado, para la muestra en cosecha se tomó plantas de 1 m de las hileras centrales. Para el peso seco se secaron en horno las muestras a 65 ± 5 °C hasta llegar a peso constante.

El índice de cosecha se calculó en cosecha, utilizando la información de la biomasa y el rendimiento de cada unidad experimental usando la siguiente ecuación:

$$IC = \frac{\text{Rendimiento del grano } gm^{-2}}{\text{Biomasa aerea total } gm^{-2}}$$

5.5.3. Eficiencia del uso de nutrientes (EUN) para nitrógeno

Para medir la eficiencia agronómica (EA) se utilizó el método que describe el IPNI (2012) donde la eficiencia agronómica se refiere al incremento de rendimiento del grano por cada unidad de fertilizante aplicado, Se determinó a través de la fórmula matemática:

$$EA = \frac{R - R(o)}{Dosis}$$

Donde, **R** es el rendimiento (Kg/ha) con la aplicación de tratamiento; **R(o)** es el rendimiento (Kg/ha) sin aplicación del tratamiento control; **Dosis** es la cantidad (Kg/ha) de nutriente aplicado.

5.6. Análisis estadístico

Los datos fueron sometidos al análisis de supuestos de normalidad y homogeneidad para cada variable, se continuó con un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si los tratamientos tienen efectos significativos sobre la variable respuesta con un nivel de significancia de $p < 0,05$ y pruebas de comparación Tukey con un nivel de confianza del 95% y un análisis de correlación de Pearson entre las variables rendimiento, número de granos m^{-2} , peso de 1000 granos, biomasa en cosecha, índice de cosecha y eficiencia agronómica del nitrógeno en el rendimiento. Estos datos se analizaron con el software estadístico (Infostat) y GraphPad Prism.

6. Resultados

6.1. Fenología del cultivo y condiciones climáticas

La Figura 2, representa las condiciones climáticas y la acumulación térmica grados/días ($^{\circ}\text{Cd}$) que se presentaron durante el ciclo del cultivo, la temperatura más alta fue $18,9^{\circ}\text{C}$ se presentó a los 19 días después de la siembra (dds) ($288,70^{\circ}\text{Cd}$) en la fase de desarrollo de las hojas y a los 62 días dds ($903,30^{\circ}\text{Cd}$) en la fase de emergencia de inflorescencia y la temperatura más baja fue $13,6^{\circ}\text{C}$ a los 126 dds ($1178,3^{\circ}\text{Cd}$) en la fase de senescencia.

La humedad relativa más alta de $94,3\%$ se presentó a los 86 dds ($1226,7^{\circ}\text{Cd}$) en la fase de desarrollo del fruto y la más baja de $68,3\%$ a los 107; 109; 119; 123 y 125 dds ($1512,2$; 1763°Cd) desde la fase de grano maduro hasta senescencia (Figura 2).

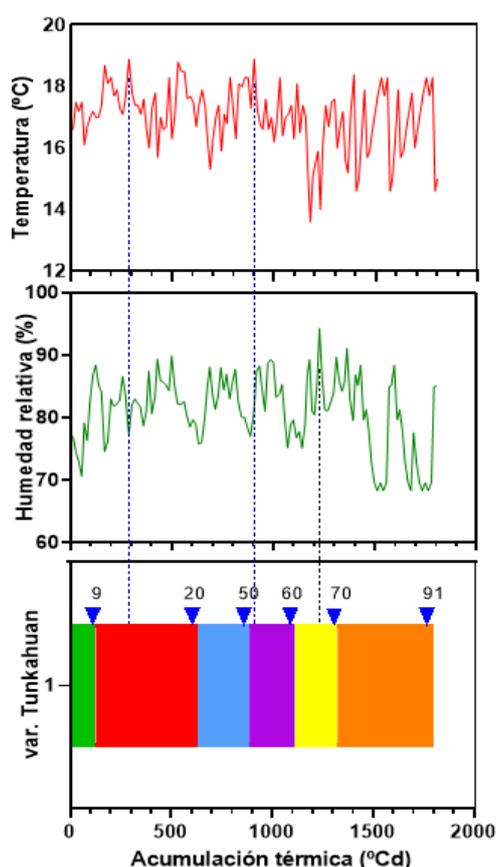


Figura 2. Temperatura media, humedad relativa registrada durante el ciclo de cultivo quinua var. Tunkahuan, triángulos azules hacia abajo indican la escala fenológica en BBCH desde la siembra hasta senescencia.

Respecto a la fenología la emergencia de cotiledones a través del suelo BBCH 9 se produjo a los 8 dds ($125,8^{\circ}\text{Cd}$), la aparición de brotes laterales BBCH 20 se produjo a los 43 dds ($632,2^{\circ}\text{Cd}$), la emergencia de inflorescencia BBCH 50 sucedió a los 61 dds ($887,4^{\circ}\text{Cd}$), el comienzo de antesis BBCH 60 ocurrió a los 77 dds ($1113,7^{\circ}\text{Cd}$), después empezó el desarrollo del fruto

BBCH 70 ocurrió a los 93 dds (1323,7 °Cd) y finalmente la senescencia BBCH 91 que se produjo a los 128 dds (1801,9 °Cd) (Figura 3).

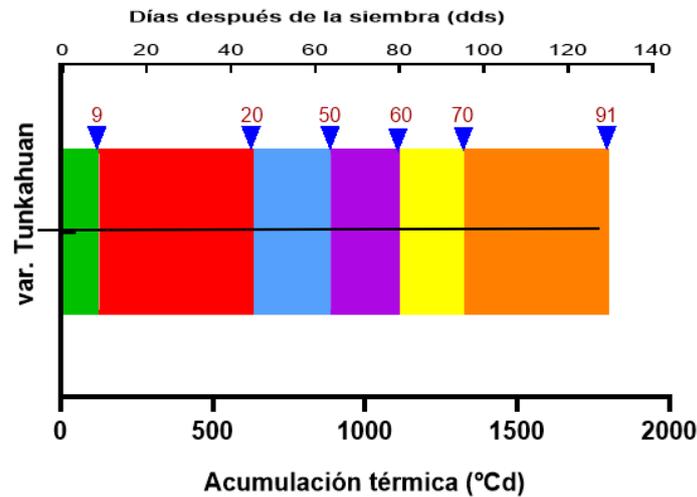


Figura 3. Duración de las etapas fenológicas de quinua var. Tunkahuan, en función de días después de la siembra (eje x superior) y acumulación térmica grados/días °Cd (eje x inferior). Verde: Emergencia de cotiledones (BBCH 9); Rojo: Brotes laterales (BBCH 20); Azul: Emergencia de inflorescencia (BBCH 50); Morado: Antesis (BBCH 60); Amarillo: Desarrollo del fruto (BBCH 70); Café: Senescencia (BBCH 91). Los números en las flechas azules representan las fases según la escala BBCH.

6.2. Dinámica del crecimiento del tallo

Al analizar la dinámica de crecimiento del tallo (Figura 4) los tratamientos evaluados no presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$), todos los tratamientos mostraron un lento crecimiento del tallo, el crecimiento activo del tallo inicio en la etapa de ramificación (50 dds), alcanzando una altura final mayor el tratamiento N100 con 150,56 cm y la altura final mínima el tratamiento N0 con 130 cm.

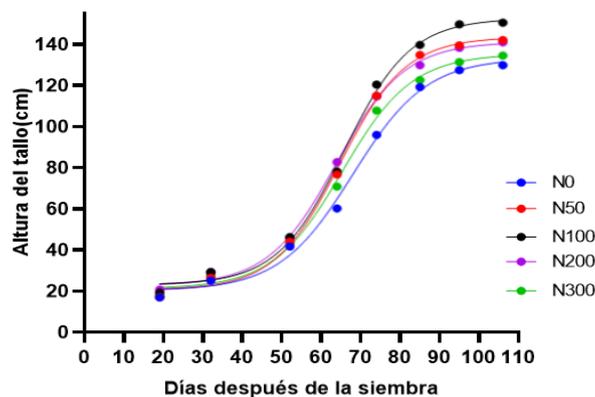


Figura 4. Dinámica de crecimiento del tallo de las plantas de quinua var. Tunkahuan con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

6.3. Tasa de elongación del tallo

Al evaluar la tasa de elongación del tallo (Figura 5) los tratamientos de fertilización nitrogenada no presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$), a pesar de ello con el tratamiento N100 la tasa de elongación del tallo fue de $1,72 \text{ cm día}^{-1}$ y con N0 fue de $1,45 \text{ cm día}^{-1}$

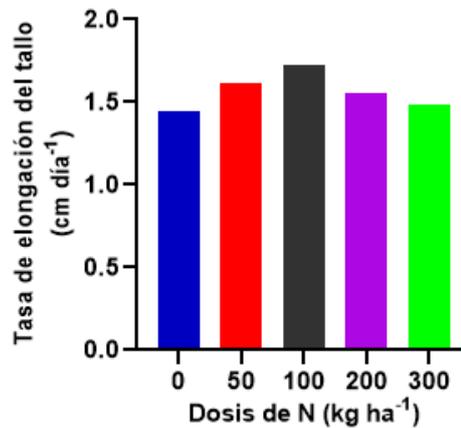


Figura 5. Tasa de elongación del tallo de las plantas de quinua var. Tunkahuan indica cuantos cm creció cada día con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada

6.4. Cobertura vegetal

La cobertura vegetal (Figura 6) no presento diferencias significativas ($p < 0,05$), sin embargo, con el tratamiento N50 se obtuvo 66,3% y con el tratamiento N0 presento 43,3% a los 90 días después de la siembra.

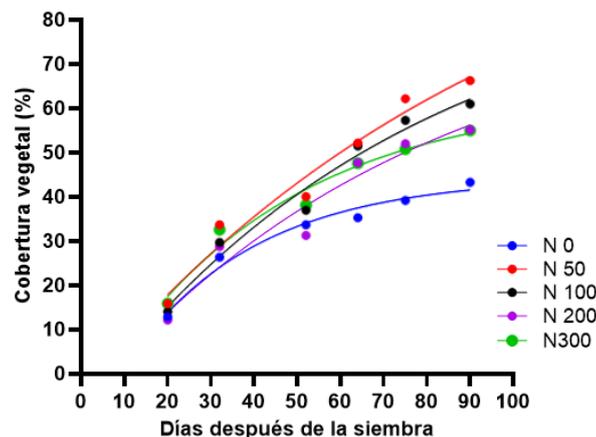


Figura 6. Cobertura vegetal (%) de quinua var. Tunkahuan en función de los días después de la siembra con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

6.5. Determinación de biomasa y concentración de nitrógeno total en plantas

Al evaluar la biomasa acumulada de las plantas (Figura 7a) los tratamientos no presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$), desde el estado vegetativo (40 dds) hasta el inicio de antesis (77 dds) la biomasa fue similar entre los tratamientos, sin embargo, en el desarrollo del fruto (93 dds) incrementaron los niveles de biomasa en todos los tratamientos hasta grano lechoso (101 dds); mostrando que los tratamientos N50 y N100 presentaron una biomasa seca de 11,9 T ha⁻¹ y el tratamiento N0 presentó 6 T ha⁻¹.

La concentración de nitrógeno total (Figura 7b) no presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) a menudo que el cultivo se desarrolla la concentración de nitrógeno total disminuyó, en el estado vegetativo a los 40 dds los tratamientos N50 y N300 obtuvieron una concentración de N de 4,68 g N g⁻¹ MS⁻¹ y el tratamiento N0 obtuvo 3 g N g⁻¹ MS⁻¹; en la etapa de emergencia de inflorescencia a los 64 dds los tratamientos obtuvieron una concentración de nitrógeno en un rango de (1,4 a 1,8 g N g⁻¹ MS⁻¹) y continuó decreciendo hasta la etapa de grano lechoso del cultivo de quinua.

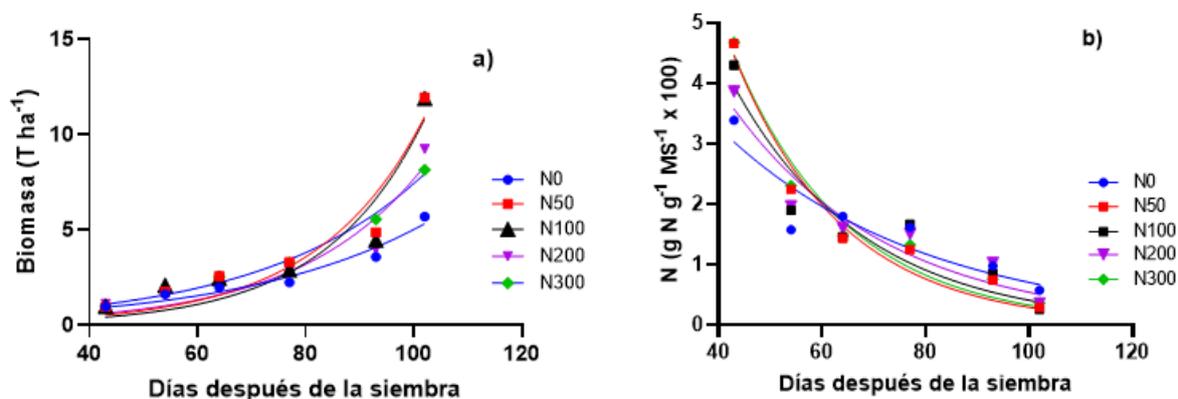


Figura 7. Biomasa aérea y acumulación de nitrógeno, a) biomasa seca acumulada (T ha⁻¹) de las plantas de quinua durante el ciclo del cultivo; b) concentración de N en los brotes N (g N g⁻¹ MS⁻¹ x 100) en función de los días después de la siembra de quinua var. Tunkahuan con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

6.6. Acumulación de nitrógeno en las plantas

La acumulación de nitrógeno (Figura 8) no presentó diferencias significativas en todo el periodo de muestreos ni en las dosis de N aplicadas. La planta de quinua muestra una baja acumulación de N en el estado vegetativo (40 dds) debido a la poca biomasa presente, hubo un incremento de N hasta grano lechoso (101 dds) que va de 9,96 a 10,93 g de N m⁻² con todos los tratamientos.

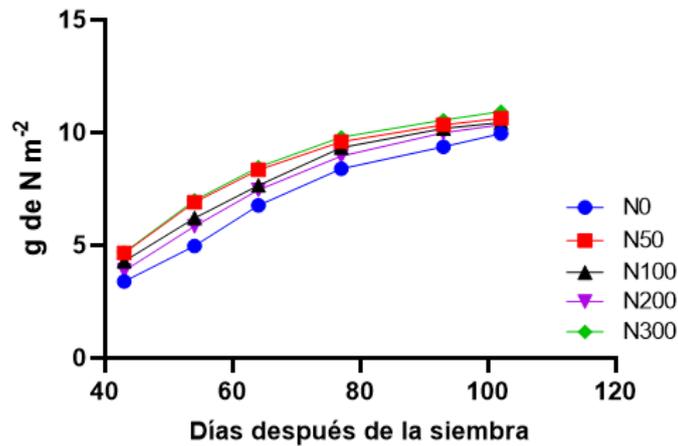


Figura 8. Acumulación de nitrógeno en la planta de quinua (g de N m^{-2}) en función de los días después de la siembra de quinua var. Tunkahuan con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

6.7. Desarrollo de la curva de dilución de nitrógeno

Con los datos de todos los tratamientos se construyó una curva de dilución de N para quinua var. Tunkahuan (Figura 9). Se consideró que el % de N permaneció constante e igual a 4,25 durante la etapa inicial del ciclo del cultivo. Este valor se calculó como el promedio de los cinco datos registrados para bajos niveles de MS. La intersección entre la línea horizontal que atraviesa la ordenada 4,25 y la curva de dilución de N determinó un valor de abscisa de 1,14 t ha^{-1} . Para un valor de MS (W) mayor a 1,14 t ha^{-1} la disminución en el % de N respondió a la siguiente ecuación: $\% N_c = 4,25 * W^{-0,41}$. Siendo el coeficiente 4,25 la concentración de N en la planta por unidad de MS en el estado de “planta aislada”, y el exponente $-0,41$ la relación entre la disminución relativa en el % de N y la tasa de crecimiento relativa.

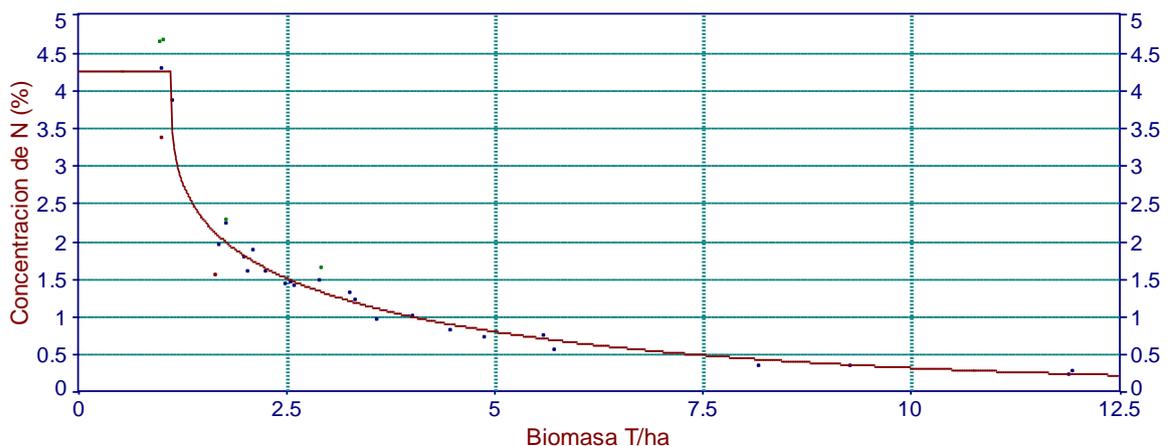


Figura 9. Puntos críticos de datos de nitrógeno (N) utilizados para definir la curva de dilución crítica de N, que describe la concentración crítica de N en quinua var. Tunkahuan.

6.8. Índice de nutrición de nitrógeno (INN)

El índice de nutrición de N (INN) es útil para diagnosticar el estado nutricional de N del cultivo. La nutrición con nitrógeno se considera óptima cuando $INN = 1.0$, mientras que $INN > 1$ muestra exceso de absorción de N y $INN < 1.0$ indican deficiencia de N.

En el estado vegetativo los puntos de todos los tratamientos mostraron $INN > 1.0$ lo que indica una nutrición excesiva, en el estado de brotes laterales (54 dds) el tratamiento $N0 = 1$ lo que indica que el N es óptimo, hasta antesis el $INN < 1.0$ lo que indica deficiencias de nitrógeno (Figura 10).

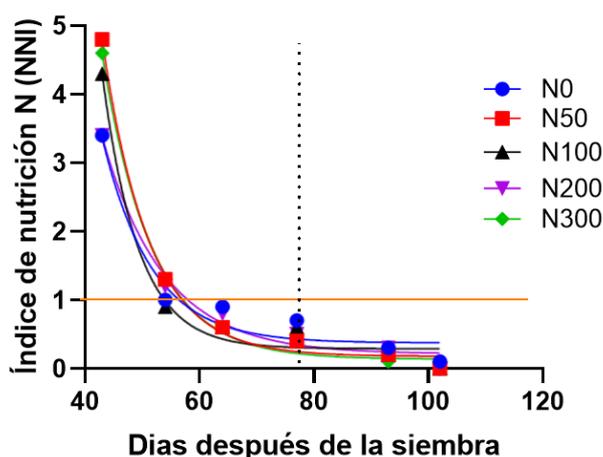


Figura 10. Índice de nutrición de nitrógeno (INN) de quinua var. Tunkahuan en las diferentes dosis de aplicación de N y etapas de crecimiento, línea vertical indica el inicio del estado de antesis

6.9. Rendimiento y sus componentes

La Tabla 4 presenta los resultados del rendimiento de grano y sus componentes del cultivo de quinua var. Tunkahuan,

En el rendimiento hay diferencias significativas ($p < 0,05$) con el tratamiento N200 el rendimiento fue de 4988 kg ha^{-1} y el menor rendimiento fue $1978,7 \text{ kg ha}^{-1}$ con el tratamiento N0.

La variable número de granos m^{-2} expresó diferencias significativas ($p < 0,05$) se obtuvo mayor número de granos m^{-2} (197347,13) con el tratamiento N200 y con N0 se obtuvo el menor número de granos m^{-2} (73409,4).

La variable peso de 1000 granos no presentaron medias estadísticamente significativas, en el presente estudio las dosis de fertilización nitrogenada no influyeron en el peso de 1000 granos, los valores variaron entre 2,4 y 2,6 g.

La biomasa en cosecha tuvo diferencias significativas ($p < 0,05$) la mayor cantidad de biomasa en cosecha fue de $16669,3 \text{ kg ha}^{-1}$ que se observó con el tratamiento N100 y la menor cantidad de biomasa fue $7182,7 \text{ kg ha}^{-1}$ que se obtuvo con el tratamiento N0.

El índice de cosecha expuso diferencias significativas ($p < 0,05$) el tratamiento N300 presentó mayor índice de cosecha de 0,42, los demás tratamientos presentaron un índice de cosecha de 0,28.

Tabla 4. Medias de rendimiento de grano, sus componentes, índice de cosecha de quinua var. Tunkahuan con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada.

| Dosis de N (kg ha^{-1}) | Rendimiento (kg ha^{-1}) | Índice de cosecha | Número de granos (m^{-2}) | Peso 1000 granos (g) | Biomasa cosecha (kg ha^{-1}) |
|---------------------------------------|--|----------------------|---|-------------------------|--|
| N0 | 1978,7 d | 0,28 b | 73409,4 c | 2,68 a | 7182,7 b |
| N50 | 3817,3 bc | 0,28 b | 156403,65 ab | 2,47 a | 13770,7 a |
| N100 | 4664 ab | 0,28 b | 183991,42 a | 2,53 a | 16669,3 a |
| N200 | 4988 a | 0,35 ab | 197347,13 a | 2,53 a | 14346,7 a |
| N300 | 3528 c | 0,42 a | 135653,42 b | 2,6 a | 8321,3 b |
| C.V. | 9,76 | 12,4 | 11,52 | 6,23 | 10,35 |
| Tratamiento N | *** | ** | *** | ns | *** |

*Letras iguales en sentido vertical no expresan diferencia estadística significativa mediante prueba de Tukey ($\text{Alfa} < 0,05$). Los valores son medias de tres repeticiones; ns = efecto no significativo; ** efecto significativo $p < 0,01$; *** efecto significativo $p < 0,001$. C.V. coeficiente de variación.

6.10. Eficiencia agronómica del uso de nitrógeno

En la Figura 11, se muestra el rendimiento del grano y la eficiencia del uso de nitrógeno en función del N disponible en el suelo, donde indica que el rendimiento tuvo un comportamiento típico de la ley de los rendimientos decrecientes (Pan et al., 2016) mientras que la Eficiencia agronómica del uso de N presentó una tendencia negativa, logrando estimar el punto de unión de ambas curvas, lo cual determina la mayor productividad con la mejor EUN dando como resultado que la dosis óptima es 90 kg N ha^{-1} con un rendimiento de $4,5 \text{ T ha}^{-1}$.

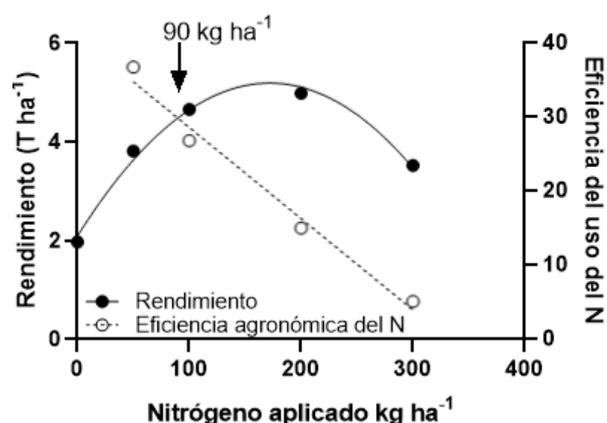


Figura 11. Eficiencia del uso del nitrógeno y rendimiento ($T\ ha^{-1}$) en función de nitrógeno aplicado $kg\ ha^{-1}$ en el cultivo de quinua var. Tunkahuan.

6.11. Correlaciones entre las variables de estudio.

Los análisis de correlaciones se realizaron con el coeficiente de correlación de Pearson y un nivel de significancia ($p < 0,05$).

El número de granos m^2 presentó una correlación positiva respecto a biomasa en cosecha, la biomasa en cosecha presentó una correlación positiva respecto a la eficiencia agronómica del N (rendimiento) y (biomasa), el índice de cosecha presentó una correlación negativa respecto a la eficiencia agronómica del N (rendimiento) y (biomasa), la eficiencia agronómica del N (rendimiento) presentó una correlación positiva respecto a la eficiencia agronómica del N (biomasa) y finalmente el rendimiento presentó una correlación positiva respecto a número de granos m^2 y a la biomasa en cosecha.

Tabla 5. Correlaciones entre las variables de estudio en el cultivo de quinua var. Tunkahuan

| | Rendimiento ($kg\ ha^{-1}$) | Número $G\ m^{-2}$ | Peso 1000 $G\ (g)$ | Biomasa cosecha ($kg\ ha^{-1}$) | IC | EFA N R |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|---|----------|------------|
| Número $G\ m^{-2}$ | 0,98*** | | | | | |
| Peso 1000G (g) | -0,32 | -0,5 | | | | |
| Biomasa cosecha ($kg\ ha^{-1}$) | 0,83*** | 0,83*** | -0,35 | | | |
| IC | 0,20* | 0,16 | 0,06 | -0,35 | | |
| EFA N (R) | 0,21* | 0,34 | -0,44 | 0,62*** | -0,73*** | |
| EFA N (B) | 0,08* | 0,21 | -0,38 | 0,65*** | -0,88*** | 0,90*** |

Los valores son los coeficientes de Pearson de tres repeticiones ns efecto no significativo; * efecto significativo $p < 0,05$; ** efecto significativo $p < 0,01$; *** efecto significativo $p < 0,001$. EFA N (R) eficiencia agronómica del nitrógeno en el rendimiento; EFAN (B) eficiencia agronómica del nitrógeno en la biomasa

7. Discusión

En este estudio el ciclo del cultivo de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) var. Tunkahuan, duró 128 días y con una acumulación térmica de 1801,9 °Cd (grados/días), son menores con 22 días si se compara con los resultados reportados por el INIAP que establece que el ciclo del cultivo de var. Tunkahuan dura de 150 a 170 días en las provincias de la sierra (Peralta y Mazón, 2014), esta variación del ciclo del cultivo puede relacionarse con las diferencias de temperatura y humedad relativa a las que se somete los cultivos por su ubicación geográfica, esto incide en la acumulación térmica del cultivo.

En cuanto a la dinámica de crecimiento del tallo y la tasa de elongación del tallo los tratamientos no influyeron, pero en las dos variables con la dosis de 100 kg N ha⁻¹ se obtuvo 150,56 cm y 1,72 cm día⁻¹ respectivamente. Wang et al., (2020) menciona que la tasa de 240 kg N ha⁻¹ resultó en una altura de 183 cm significativamente más alta que los tratamientos de 80 kg N ha⁻¹. Estos resultados no coinciden ya que nuestro estudio indica que a mayor aplicación de N la altura de la planta disminuye esto podría deberse al exceso de N que fue perjudicial o porque no se aplicó en el momento adecuado por lo tanto ya no se pudo observar el efecto sobre el crecimiento. Según Urzúa (2015) citado por (Solis, 2019) el nitrógeno es un elemento esencial para las plantas, ya que forma parte de compuestos tan fundamentales como proteínas, ácidos nucleicos y clorofila, necesiándose principalmente en los tejidos vegetales en crecimiento.

En la cobertura vegetal los tratamientos no influyeron, pero con la dosis 50 kg N ha⁻¹ la cobertura vegetal fue 66,3%, a medida que se aumenta la dosis de nitrógeno la cobertura vegetal disminuye; Solis (2019) explica que el nitrógeno promueve el rápido crecimiento (incremento en el tamaño de la planta y número de macollos) y aumenta el tamaño de las hojas, el número de espiguillas por panoja, el porcentaje de espiguillas llenas y el contenido de proteínas en el grano. En consecuencia, el nitrógeno afecta todos los parámetros que contribuyen al rendimiento. Reussi y Echeverría citado por (Solis, 2019) reportan que un adecuado suministro de nitrógeno está asociado con vigorosos crecimientos vegetativos y un intenso color verde. Cantidades bajas de nitrógeno producen una reducción del índice de área foliar y de su duración lo cual afecta el peso seco de las espigas a floración, variable altamente relacionada con el número de granos, principal componente del rendimiento.

Las dosis de N no difieren en la acumulación de biomasa, pero con las dosis de 100 y 50 kg N ha⁻¹ se obtuvo 11,9 t ha⁻¹, las dosis de nitrógeno diferentes de estas disminuyeron la biomasa, debido a que el exceso de nitrógeno ocasiona exceso de aminoácidos solubles que no pueden

ser usados para el proceso de crecimiento prolongando el crecimiento y madurez (Mengel y Kirkby, 2000). Los resultados concuerdan por los registrados por Ulloa y Valle (2021) obtuvo una biomasa de 11.4 t ha^{-1} en la variedad Imbaya con una fertilización de $150-80-40 \text{ kg ha}^{-1}$ de N-P-K, en Pichincha.

En cuanto a la concentración de nitrógeno total en plantas no influyeron los tratamientos, en el estado vegetativo tuvo mayor concentración de N y a menudo que se desarrolló el cultivo disminuyó la concentración de N hasta llegar a la etapa de grano lechoso. Según Uhart y Andrade (1995) el nitrógeno constituye un 2% del peso total seco de la planta, concentrándose en los tejidos jóvenes, a medida que la planta llega a la madures disminuye el porcentaje de nitrógeno. El contenido de N en la planta varía en función de las etapas fenológicas de la planta, en el caso de la quinua disminuyó a medida que va desarrollando la planta, lo que indica que la quinua extrae y necesita mayor cantidad de N en las etapas vegetativas, pero una vez que la planta finaliza la etapa vegetativa y empieza la floración disminuye el contenido de N en el área foliar debido a que la planta orienta su producción a la floración y desarrollo reproductivo.

Los tratamientos no tuvieron efecto sobre la acumulación de N la planta de quinua alcanzo una acumulación de $10,93 \text{ g de N m}^{-2}$ en la etapa de grano lechoso (101 dds). Ulloa y Valle (2021) obtuvieron una acumulación de N en quinua de 9 g de N m^{-2} a los 120 dds, estos resultados no concuerdan debido a que son variedades diferentes, los tratamientos de fertilización aplicados son $150-80-40 \text{ kg ha}^{-1}$ de N-P-K, en Pichincha además el ciclo del cultivo también difiere. Así mismo Miranda et al. (2012) encontró una acumulación de N en la planta de 60 Kg ha^{-1} fertilizadas con 15 Mg ha^{-1} de estiércol.

En el presente estudio la curva de dilución de nitrógeno de quinua var. Tunkahuan en base a la biomasa aérea fue de (4,25%) menor a la curva desarrollada por Aguirre (2010) que fue (4,35%) basada en la biomasa de las variedades 2-Want y NL-6 de quinua en climas templados de Buenos Aires. Lebonvallet (2008) determinó la curva de dilución de N para quinua (4,1%) en los Andes Bolivianos, las diferencias que presenta tanto en la acumulación de N y en el desarrollo de la curva de dilución de N puede ser porque son variedades y condiciones ambientales diferentes al igual que los tratamientos aplicados.

En el rendimiento del grano de quinua la dosis de 200 kg N ha^{-1} si influyo dando 4 988 kg ha^{-1} Según el MAGAP (2013) obtiene rendimientos de 1,5 a 2,5 /ha sin fertilización. Los resultados se asemejan con los que registro Luzón (2016) quien obtuvo un rendimiento de 5303 kg ha^{-1} con una fertilización de 200 kg N ha^{-1} en la Universidad Nacional de Loja.

El número granos presentó una relación con el rendimiento ya que concuerda con el tratamiento 200 kg N ha⁻¹ que alcanza el mayor número de granos, el peso del grano no se vio afectado por los tratamientos, los valores variaron entre 2,4 y 2,6 g, lo que indica que el nivel de nitrógeno tiene poco efecto en peso de los granos.

El Índice de cosecha (IC) incrementa a mayor dosis de nitrógeno con 300 kg N ha⁻¹ se obtuvo un IC de 0,42. Los resultados no concuerdan con los que registro Ulloa y Valle (2021) que obtuvieron un IC de 0,63% con la variedad Imbaya. Shams (2012) explica que los incrementos del IC de la quinua con el aumento de las dosis de nitrógeno se deben principalmente al papel del N en la estimulación de la actividad metabólica que contribuyó al aumento en la cantidad de metabolitos, la mayoría de los cuales se utiliza para generar rendimiento y sus componentes.

La eficiencia de uso de nitrógeno (EUN) refleja la capacidad de la planta de transformar el N absorbido en rendimiento (grano), en este estudio la dosis optima de N fue de 90 kg N ha⁻¹ con un rendimiento de 4,5 t ha⁻¹ de quinua. Franco (2018) obtuvo una dosis optima de 62 Kg de N ha⁻¹ con un rendimiento de 4,17 t ha⁻¹, lo cual difiere de los resultados obtenidos en este estudio, estas diferencias se pueden presentar por las etapas fenológicas en las que se aplicó el nitrógeno. Así mismo Berti, et al. (2020) demuestra que la eficiencia agronómica de uso del nitrógeno se reduce al aumentar la disponibilidad de nitrógeno. Hoffman et al. (2016) indican que mantener una elevada EUN es importante, por la productividad parcial de este nutriente o por su impacto en la rentabilidad del sistema agrícola, también por el control del potencial de contaminación.

8. Conclusiones

La curva de dilución de nitrógeno obtenida en este ensayo, bajo las condiciones de este experimento es una aproximación de la condición nutricional crítica en quinua, sin embargo, debido a la escasa sensibilidad a las dosis altas de nitrógeno, es necesario mejorar el establecimiento de los tratamientos de nitrógeno para generar puntos que evidencien la carencia y exceso de fertilización, para mejorar la curva de dilución del nitrógeno.

La dosis de 100 kg N ha⁻¹ permitió un mayor crecimiento del tallo, tasa de elongación del tallo y biomasa en las plantas.

La concentración de nitrógeno total en las plantas disminuyó durante el crecimiento del cultivo, es decir que el contenido de N en la planta varía en función de las etapas fenológicas de la planta. Se observó una deficiencia de N en las etapas previas a floración, indicando que se debe mejorar la eficiencia de aplicación del N, ya que las dosis altas no impactaron positivamente en el crecimiento vegetal pre antesis.

Se obtuvo un rendimiento potencial del grano de 4988 kg ha⁻¹ con la dosis 200 kg N ha⁻¹, este incremento del rendimiento se dio principalmente por un mayor número de granos y biomasa, superando el promedio de producción nacional, demostrando así que este cultivo de quinua representa una buena opción para diversificar la producción de granos en la provincia de Loja.

La dosis agronómica óptima para la quinua en base a la eficiencia del uso del nitrógeno fue 90 kg ha⁻¹ de N, con la cual se alcanzó un rendimiento de 4,5 t ha⁻¹.

9. Recomendaciones

La fertilización nitrogenada debe hacerse tempranamente para que tenga efecto sobre el crecimiento vegetal o usar fuentes de liberación lenta al momento de la siembra para unificar los tratamientos.

Efectuar más estudios sobre la determinación de la curva de dilución de nitrógeno en distintas zonas geográficas para extrapolar y comparar los resultados de las zonas donde se produce quinua.

10. Bibliografía

- Aguirre, P. (2010). Dinámica de acumulación y partición de nitrógeno en cultivares de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd) adaptados a climas templados. Universidad de Buenos Aires, 54. Obtenido de <http://ri.agro.uba.ar/files/intranet/intensificacion/2010aguirrecastropaula.pdf>
- Aguirre, Z. (2018). Principios para el estudio de las familias botánicas del Ecuador. Loja, Ecuador, Ecuador: Universidad Nacional de Loja. Primera Edición. Obtenido de https://www.academia.edu/8450870/Guia_de_las_familias_bot%C3%A1nicas_del_sur_del_Ecuador
- Alandia, G., Rodriguez, P., Jacobsen, E., Bazile, D., & Condori, B. (2020). Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Global Food Security*, 26. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100429>
- Bazile, D., Bertero, C., & Nieto, D. (2015). “Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013”. FAO (Santiago de Chile) y CIRAD. Obtenido de <https://www.fao.org/3/I4042S/i4042s.pdf>
- Berti, D., Wilckens, E., Hevia, H., Serri, H., Vidal, I., & Mendez, C. (2020). Fertilización nitrogenada en quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Ciencia e Investigación Agraria*, 81-90. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14001/40227>
- Borda, A. (2011). Analisis de productividad y componentes del rendimiento de tres variedades de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en la comunidad callapa - altiplano central. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/7464/T-1583.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bravo, B., Miranda, M., & López, J. (2021). Economic Impact of Quinoa Consumption in the Diet of University Students Case: ESPOCH Agroindustry Career. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of STEAM*, 1(1), 648-664. doi:<https://doi.org/10.18502/epoch.v1i1.9600>
- Connor, D. J., & Sadras, V. O. (1992). Physiology of yield expression in sunflower. *Field Crops Research*, 30, Issues 3-4,, 333-389. doi:[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90006-U](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90006-U)

- Erley, G. S., Kaul, H.-P., Kruse, M., & Aufhammer, W. (2005). Yield and nitrogen utilization efficiency of the pseudocereals amaranth, quinoa, and buckwheat under differing nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy*, 95-100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eja.2003.11.002>
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2005). Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97-185. doi:[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6)
- FAO. (2011). La Quinoa: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. Obtenido de <http://www.fao.org/3/aq287s/aq287s.pdf>
- Franco, L. (2018). Eficiencia de utilización del nitrógeno en el rendimiento de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) adaptada a la zona norte de la provincia de Los Ríos. Obtenido de <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3243>
- García, F., & Correndo, A. (2016). Métodos de diagnóstico nutricional en cultivos. *resiliar xxiv congreso aapresid*. Obtenido de <https://2016.congresoaaapresid.org.ar/wp-content/uploads/2017/07/Garcia-Fernando-acta.pdf>
- Gomez, & Aguilar, E. (2016). Guía de cultivo de la quínoa (Vol. 1). (U. N. Molina, Ed.) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Obtenido de <http://www.fao.org/3/i5374s/i5374s.pdf>
- González, J. A., & Prado, F. E. (2013). Quinoa: aspectos biológicos, propiedades nutricionales y otras consideraciones para su mejor aprovechamiento. *Ciencia y tecnología de los cultivos industriales*, 3(5), 5-15. Obtenido de <http://inta.gob.ar/cultivos-industriales>
- Gordillo-Bastidas, E., Díaz-Rizzolo, D., Roura, E., Massanés, T., & Gomis, R. (2016). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), from Nutritional Value to Potential Health Benefits: an integrative review. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 6(497), 10-4172. doi:10.4172/2155-9600.1000497
- Greenwood, D. J. (2001). Modeling n-response of field vegetable crops grown under diverse conditions with n_able: a review. *Journal of Plant Nutrition* , 24(11). doi:<https://doi.org/10.1081/PLN-100107313>
- Hinojosa, L., Gonzales, J., Masias, F., Barrios, H., & Fuentes, F. (2018). Quinoa Abiotic Stress Responses: A Review. *Plants (Basel)*, 7(4), 29. doi:10.3390/plants7040106

- Hoffman, E., Fassana, N., Mazzilli, S., Berger, A., & Ernst, O. (2016). La necesidad de incrementar la eficiencia de uso del nitrógeno en cereales de invierno. *Simposio Nacional de Agricultura de Secano Paysandú*, 131-140. Obtenido de [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C1A5D8F37C76C39B032580910057CC9B/\\$FILE/2.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/C1A5D8F37C76C39B032580910057CC9B/$FILE/2.pdf)
- Jellen, E., Maughan, P., Fuentes, F., & Kolano, B. (2014). Botánica, Filogenia y Evolución. Capítulo Número 1.1. En D. Bazile, D. Bertero, & C. Nieto, "*Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013*" (págs. 12-25). FAO (Santiago de Chile) y CIRAD (Montpellier, Francia). Obtenido de <https://www.fao.org/3/I4042S/i4042s.pdf>
- Lebonvallet, S. (2008). Implantation du quinoa et simulation de sa culture sur l'altiplano bolivien Quinoa establishment and simulation of its culture on the bolivian altiplano. Institut national agronomique Paris-Grignon. Obtenido de <http://www.secheresse.info/spip.php?article9539>
- Lemaire, G., Jeuffroy, H., & Gastal, F. (2008). Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage: Theory and practice for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28(4), 614-621. doi:10.1016/j.eja.2008.01.005
- Luzón, S. (2016). Respuesta de la quinua variedad Tunkahuan a la fertilización nitrogenada, en las condiciones edafoclimáticas de la Argelia. Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja, Loja. Obtenido de <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/10110/1/TESIS%20STALIN%20LUZ%c3%93N%20ZUMBA.pdf>
- MAG. (2013). La quinua por su potencial nutritivo es considerada para erradicar el hambre en el mundo. Obtenido de <https://www.agricultura.gob.ec/la-quinua-por-su-potencial-nutritivo-es-considerada-para-erradicar-el-hambre-en-el-mundo-2/>
- Mejía de Tafur, M., & Menjivar Flores, J. (2010). Nutrición mineral de arroz. En V. M. Degiovanni Beltramo, C. P. Martínez Racines, & F. Motta O., *Producción eco-eficiente del arroz en América Latina* (págs. 306-335). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, CO. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10568/82509>
- Mendoza, N., Eroncio, O., & Cecilia, G. (2016). Fertilización nitrogenada en el rendimiento de dos variedades de quinua. *Infinitum*, 6(1), 11-15. Obtenido de <https://doi.org/10.51431/infinitum.v6i1.3>

- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2000). Principios de nutrición vegetal.
- Mercado de semillas de quinua: crecimiento, tendencias, impacto de covid-19 y pronosticos (2022-2027). Obtenido de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/north-america-quinoa-seeds-market>
- Miranda, R., Carlesso, R., Huanca, M., Mamani, P., & Borda, A. (2012). Rendimiento y acumulación de nitrógeno en la quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) producida con estiércol y riego suplementario. *Venesuelos*, 20(1), 21-29. Obtenido de http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/4567
- Montero, C., & Romero, C. (2017). Análisis Económico de la Producción Nacional. Lima: MINAGRI. Obtenido de <https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/359#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20econ%C3%B3mico%20de%20la,menor%20cosecha%20de%20Arequipa%20y>
- Pan, W. L., McClellan, T., Hammac, A., McCracken, V. A., & Koenig, R. T. (2016). Mitscherlich-Modeled, Semi-Arid Canola Nitrogen Requirements Influenced by Soil Nitrogen and Water. *Agronomy Journal*, 108. doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2015.0378>
- Peralta, E., & Mazon, N. (2014). La quinua en Ecuador. En D. Bazile, D. Bertero, & C. Nieto, “Estado del arte de la quinua en el mundo en 2013” (págs. 462-4776). Montpellier, Francia: FAO (Santiago de Chile) y CIRAD . Obtenido de <https://www.fao.org/3/I4042S/i4042s.pdf>
- Pérez, F. (2017). Fisiología vegetal parte iii nutrición mineral. London: Academic Press.
- Rojas, A. (2021). Caracterización fenotípica de 402 accesiones de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones de la molina-lima. Tesis para obtener el título de ingeniería agrónoma. UNALM. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/4804/rojas-capcha-alessandra-cynthia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojas, C., Burbano, G., & Edwin, M. (2020). Evaluación del rendimiento de quinua bajo diferentes densidades, fertilización y métodos de siembra en Cauca. *Rev.Bio.Agro*, 18(1). doi:10.18684/bsaa.v18n1.1410

- Sandaña, P., & Calderini, D. F. (2012). Comparative assessment of the critical period for grain yield determination of narrow-leafed lupin and pea. *European Journal of Agronomy*, 40, 94-101. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.02.009>
- Satorre, E., Benech, R., Slafer, G., de la Fuente, E., Millares, D., Otegui, M., & R, S. (2015). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Facultad Agronomía.
- Shams, A. (2012). Response of quinoa to nitrogen fertilizer rates under sandy soil conditions. *Centro de Investigación Agrícola (ARC)*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/343351327_response_of_quinoa_to_nitrogen_fertilizer_rates_under_sandy_soil_conditions
- Solis, V. (2019). "El nitrógeno como base de la producción agrícola en cultivos de ciclo corto". (*Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2019*). Obtenido de <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/6011/E-UTB-FACIAG-ING%20AGRON-000127.pdf?sequence=1>
- Tapia, M., & Fries, A. (2007). Guía de campo de los cultivos andinos. Lima: FAO Y ANPE. Obtenido de <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Biodiversidad/71.pdf>
- Ulloa, M., & Valle, L. (2021). Índice de cosecha con macro-nutrientes en grano de quinua (*Chenopodium quinoa Willd*). *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 5(13). doi:<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v5i13.95>
- Villasuso, E. (2015). Estrategias de crecimiento y generación del rendimiento potencial en ocho genotipos de soja (glyvine max (l) merr) que difieren en su grupo de madurez. Trabajo Final de Grado para optar al título de Ingeniero Agrónomo. Obtenido de https://inta.gob.ar/sites/default/files/villasuso_eugenio_estategias_de_crecimiento_y_generacion_de_rendimientos.pdf
- Zaidi, N., Bélanger, G., Claessens, A., Lefebvre, L., Cambouris, A. N., & Tremblay, N. (2010). Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Spring Wheat. *Agronomy Journal*, 102(1), 241-250. Obtenido de <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0266>

11. Anexos

Anexo 1. Análisis del suelo

| | | |
|--|--|------------------------|
|  AGROCALIDAD AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL FITO Y ZOOAGROPECUARIO | LABORATORIO DE SUELOS, FOLIARES Y AGUAS Vía Interoceánica Km. 140 y Eloy Alfaro, Granja del MAGAP, Tumbaco - Quito Teléf.: 021828860 Ext. 2080 | PGT/SFA/09-FO01 |
| | Rev. 5 | |
| | INFORME DE ANÁLISIS DE SUELO | |

Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con acreditación N° SAE LEN 09.003

Informe N°: LN-SFA-021-0114
 Fecha emisión Informe: 21/10/2021

DATOS DEL CLIENTE

Persona o Empresa solicitante¹: Gabriela Jiménez Jiménez y Gabriela Pineda Suquilanda
Dirección¹: México y Brasil **Teléfono¹:** 0959759125
Provincia¹: Loja **Cantón¹:** Loja **Correo Electrónico¹:** gabymj20@gmail.com
N° Orden de Trabajo: 11-2021-303 **N° Factura/Documento:** 012-001-1055

DATOS DE LA MUESTRA:

| | | |
|---|--|----------------------|
| Tipo de muestra¹: Suelo | Conservación de la muestra: Lugar fresco y seco | |
| Cultivo¹: Quinua | | |
| Provincia¹: Loja | Coordenadas¹: | X: ---- |
| Cantón¹: Loja | | Y: ---- |
| Parroquia¹: San Sebastián | | Altitud: ---- |
| Muestreado por¹: ---- | | |
| Fecha de muestreo¹: 01-10-2021 | Fecha de inicio de análisis: 07-10-2021 | |
| Fecha de recepción de la muestra: 07-10-2021 | Fecha de finalización de análisis: 21-10-2021 | |

RESULTADOS DEL ANÁLISIS

| CÓDIGO DE MUESTRA LABORATORIO | IDENTIFICACIÓN DE CAMPO DE LA MUESTRA ¹ | PARÁMETRO ANALIZADO | MÉTODO | UNIDAD | RESULTADO |
|-------------------------------|--|-------------------------------|---|---------|-----------|
| SFA-21-1585 | Quinua 1 | pH a 25 °C | Electrométrico PGE/SFA/06 EPA 9045D | --- | 5,96 |
| | | Materia Orgánica ² | Volumétrico PGE/SFA/09 | % | 1,77 |
| | | Nitrógeno ² | Volumétrico PGE/SFA/09 | % | 0,09 |
| | | Fósforo ² | Colorimétrico PGE/SFA/11 | mg/kg | 16,3 |
| | | Potasio ² | Absorción Atómica PGE/SFA/12 | cmol/kg | 0,10 |
| | | Calcio ² | Absorción Atómica PGE/SFA/12 | cmol/kg | 3,84 |
| | | Magnesio ² | Absorción Atómica PGE/SFA/12 | cmol/kg | 0,28 |
| | | Hierro ² | Absorción Atómica PGE/SFA/13 | mg/kg | 205,1 |
| | | Manganeso ² | Absorción Atómica PGE/SFA/13 | mg/kg | 13,17 |
| | | Cobre ² | Absorción Atómica PGE/SFA/13 | mg/kg | 2,68 |
| | | Zinc ² | Absorción Atómica PGE/SFA/13 | mg/kg | < 1,60 |
| | | CaC ² | Cálculo PGE/SFA/14 | cmol/kg | 11,54 |

Analizado por: Katty Pastás, Pablo Atapuma

Nota: El resultado corresponde únicamente a la muestra entregada por el cliente en esta fecha. Está prohibida la reproducción parcial de este informe.

¹ Datos suministrados por el cliente; el laboratorio no se responsabiliza por esta información.

| | | |
|---|--|---|
|  AGROCALIDAD AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL FITO Y ZOOSANITARIO | LABORATORIO DE SUELOS, FOLIARES Y AGUAS Vía Interoceánica Km. 14½ y Eloy Alfaro, Granja del MAGAP, Tumbaco - Quito Teléf.: 023828860 Ext. 2080 | PGT/SFA/09-FO01 |
| | INFORME DE ANÁLISIS DE SUELO | Rev. 5 Hoja 2 de 2 |

Observaciones:

- (**) Bases de cambio.
- Informe revisado por: Pablo Atapuma
- El laboratorio no es responsable del muestreo por lo que los resultados se aplican a la muestra como se recibió.
- Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del SAE.
- Las interpretaciones que se indican a continuación, están FUERA del alcance de acreditación del SAE.

| INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS - REGIÓN SIERRA | | | | | | | | | | |
|--|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|------------|------------|------------|
| PARÁMETRO | MO (%) | N (%) | P (mg/kg) | K (cmol/kg) | Ca (cmol/kg) | Mg (cmol/kg) | Fe (mg/kg) | Mn (mg/kg) | Cu (mg/kg) | Zn (mg/kg) |
| BAJO | <1,0 | <0,15 | <10,0 | <0,20 | <1,0 | <0,33 | <20,0 | <5,0 | <1,0 | <3,0 |
| MEDIO | 1,0 - 2,0 | 0,15 - 0,30 | 10,0 - 20,0 | 0,20 - 0,38 | 1,0 - 3,0 | 0,33 - 0,66 | 20,0 - 40,0 | 5,0 - 15,0 | 1,0 - 4,0 | 3,0 - 7,0 |
| ALTO | >2,0 | >0,30 | >20,0 | >0,38 | >3,0 | >0,66 | >40,0 | >15,0 | >4,0 | >7,0 |

| INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS - REGIÓN SIERRA Y COSTA | | | | | |
|--|-------|-------------------|----------------------|----------------------|----------|
| | ÁCIDO | LIGERAMENTE ÁCIDO | PRÁCTICAMENTE NEUTRO | LIGERAMENTE ALCALINO | ALCALINO |
| pH | ≤ 5,5 | > 5,5 - 6,5 | > 6,5 - 7,5 | > 7,5 - 8,0 | > 8,0 |

FUENTE: INIAP. 2002



SE FIRMÓ DIGITALMENTE POR:
PABLO XAVIER ATAPUMA ACUNA

Ing. Pablo Atapuma
Responsable de Laboratorio (E)
Suelos, Foliar y Aguas

Anexo 2. Plan de fertilización

Dosis para el encalado

Cal Dolomina (37,6 % Ca – 6% MgO)

10 000 m² 619,09 Kg/ha de Ca

72 m² x

$$X = (72 \text{ m}^2 \times 619,09 \text{ Kg/ha de Ca}) / 10\,000 \text{ m}^2 = 4,45 \text{ Kg de CA}$$

100 kg cal dolomita 37,6 Kg de Ca

x 4,45 de Ca

$$X = 11,8 \text{ Kg de cal dolomita}$$

- Dosis de cal dolomita por parcela = 11,8 kg /15 parcelas = 0,78 Kg/ parcela.

Dosis de Nitrogeno (N)

Materia Orgánica 1,77%

100 kg de suelo 1,77 Kg de MO

$$dp = 1,3$$

$$p = 0,2 \text{ mm}$$

$$\text{Área} = 10\,000 \text{ m}^2$$

$$\text{PCA} = (10\,000 \text{ m}^2) \times (0,2 \text{ mm}) \times (1,3) = 2\,600 \text{ tn}$$

1 tn 1000 kg

2 600 tn x

$$X = (2\,600 \text{ tn} \times 1000 \text{ kg}) / 1 \text{ tn} = 2\,600\,000 \text{ Kg}$$

100 Kg de suelo 1,77 Kg MO

2 600 000 Kg x

$$X = 46,02 \text{ Kg MO}$$

$$\text{NT} = (\text{Total}) 5\%; \quad (46,02 \text{ Kg MO} \times 5\%) = 2,301 \text{ Kg de MO}$$

$$\text{ND} = (\text{Disonible}) 2\%; \quad (2,301 \text{ Kg MO} \times 2\%) = \mathbf{46,02 \text{ Kg de MO}}$$

Requerimientos nutricionales de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.)

N: 120 P: 80 K:16

Urea (46%)

✓ **T2: 50 Kg/ha**

$$50 + 46,02 = 96,02 \text{ Kg/ha N}$$

Aplicación de N

$$\begin{array}{r} 100 \text{ Kg} \\ \times \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 46 \text{ N} \\ 96,02 \text{ Kg/ha N} \\ \hline \end{array}$$

$$X = (100 \times 96,02) / 46 = 208,74 \text{ Kg/ha de N}$$

Para parcela

$$\begin{array}{r} 10\,000 \text{ m}^2 \\ 6 \text{ m}^2 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 208,74 \text{ Kg/ha de N} \\ x \\ \hline \end{array}$$

$$X = 0,13 \text{ kg} \implies 130 \text{ gr}$$

✓ **T3: 100 Kg / ha**

$$100 + 46,02 = 146,02 \text{ Kg/ha N}$$

Aplicación de N

$$\begin{array}{r} 100 \text{ Kg} \\ \times \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 46 \text{ N} \\ 146,02 \text{ Kg/ha N} \\ \hline \end{array}$$

$$X = (100 \times 146,02) / 46 = 317,4 \text{ Kg/ha de N}$$

Para parcela

$$\begin{array}{r} 10\,000 \text{ m}^2 \\ 6 \text{ m}^2 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 317,4 \text{ Kg/ha de N} \\ x \\ \hline \end{array}$$

$$X = 0,19 \text{ kg} \implies 190 \text{ gr}$$

✓ **T4: 200 Kg / ha**

$$200 + 46,02 = 246,02 \text{ Kg/ha N}$$

Aplicación de N

$$\begin{array}{r} 100 \text{ Kg} \\ \times \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 46 \text{ N} \\ 246,02 \text{ Kg/ha N} \\ \hline \end{array}$$

$$X = (100 \times 246,02) / 46 = 534,8 \text{ Kg/ha de N}$$

Para parcela

$$\begin{array}{r} 10\,000 \text{ m}^2 \\ 6 \text{ m}^2 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{r} 534,8 \text{ Kg/ha de N} \\ x \\ \hline \end{array}$$

$$X = 0,32 \text{ kg} \implies 320 \text{ gr}$$

✓ **T5: 300 Kg / ha**

$$300 + 46,02 = 346,02 \text{ Kg/ha N}$$

Aplicación de N

100 Kg

46 N

x

346,02 Kg/ha N

$$X = (100 \times 346,02) / 46 = 752,2 \text{ Kg/ha de N}$$

Para parcela

10 000 m²

752,2 Kg/ha de N

6 m²

x

$$X = 0,45 \text{ kg} \implies 450 \text{ gr}$$

Anexo 3. Fenología del cultivo de quinua var. Tunkahuan

Tabla 6. Fenología del cultivo de quinua var. Tunkahuan en condiciones de La Argelia, parroquia Punzará, cantón Loja de la provincia Loja.

| ESTADIO PRINCIPAL | DESCRIPCIÓN | FECHA | # Días |
|--|--|--------------|---------------|
| | Siembra | 29-10-21 | 0 |
| Germinación 0 | Emergencia de la radícula | 31-10-21 | 2 |
| | Emergencia de hipocótilo | 01-11-21 | 3 |
| | Hipocótilo con los cotiledones crecen a la superficie | 02-11-21 | 4 |
| | Cotiledones emergen a través del suelo | 07-11-21 | 8 |
| Desarrollo de hojas 1 | Primer par de hojas verdaderas | 10-11-21 | 11 |
| | Segundo par de hojas verdaderas | 13-11-21 | 14 |
| | Tercer par de hojas verdadera | 16-11-21 | 17 |
| | Cuarto par de hojas verdaderas | 20-11-21 | 21 |
| | Sexto par de hojas verdaderas | 25-11-21 | 26 |
| | 8-9 pares de hojas verdaderas | 02-12-21 | 32 |
| Formación de brotes laterales- Ramificación 2 | Presencia de yemas en las axilas de cada hoja | | 43 |
| | Brotes laterales visibles | 16-12-21 | 52 |
| | Un brote lateral visible | 17-12-21 | 53 |
| | Dos brotes laterales visibles | 18-12-21 | 54 |
| | Nueve brotes laterales visibles | 24-12-21 | 60 |
| Emergencia de la inflorescencia 5 | Formación de primordios foliares encerrados por hojas protectoras | 25-12-21 | 61 |
| | Las hojas protectoras se separarán, la inflorescencia completamente visible | 28-12-21 | 64 |
| | Elongación de la panoja las flores siguen cerradas | 05-12-22 | 72 |
| Floración 6 | Inicio de antesis (flores de la inflorescencia principal con las primeras anteras extruidas) | 10-12-22 | 77 |
| | Fin de la antesis (la inflorescencia principal florece con las primeras anteras senescentes) | 13-01-22 | 80 |
| | Antesis completa (flores de la inflorescencia principal con anteras senescentes) | 18-01-22 | 85 |
| Desarrollo del fruto 7 | Llenado de grano (engrosamiento del ovario y primeros granos visibles) | 26-01-22 | 93 |
| Fruto maduro 8 | Grano lechoso (fácilmente aplastado con las uñas, contenido pastoso blanco, pericarpio verde, beige, rojo o negro) | 03-02-22 | 101 |

| | | | |
|----------------------|---|----------|-----|
| | Grano maduro (difícil de aplastar con las uñas, contenido seco, el grano tiene un color beige en su exterior) | 08-02-22 | 106 |
| | Grano pastoso, hojas basales amarillas cayendo | 16-02-22 | 114 |
| | Dos brotes laterales visibles | 22-02-22 | 120 |
| Senescencia 9 | Todas las hojas muertas y el tallo paso de amarillo a marrón | 02-02-22 | 128 |
| | Planta muerta y seca | 05-03-22 | 131 |
| | Producto cosechado | 07-03-22 | 133 |

Anexo 4. Evidencias fotográficas



Figura 1. Pasado de rastra



Figura 2. Terreno preparado para la siembra



Figura 3. Trazado de surcos para la siembra



Figura 4. Siembra a chorro continuo



Figura 5. Germinación -emergencia



Figura 6. Desarrollo de hojas



Figura 7. Elongación del tallo



Figura 8. Aplicación de nitrógeno



Figura 9. Desarrollo de brotes laterales



Figura 10. Segunda aplicación de nitrógeno



Figura 11. Emergencia de la inflorescencia



Figura 12. Floración



Figura 13. Desarrollo del fruto



Figura 14. Aplicación de fungicida e insecticida



Figura 15. Toma de datos de altura



Figura 16. Hojas basales amarillentas



Figura 17. Madurez fisiologica



Figura 18. Cosecha



Figura 19. Peso de muestras de biomasa



Figura 20. Secado de muestras de biomasa en estufa



Figura 21. Peso de granos, rendimiento



Figura 22. Peso de 100 granos



Figura 23. Segunda visita, revisión de datos.

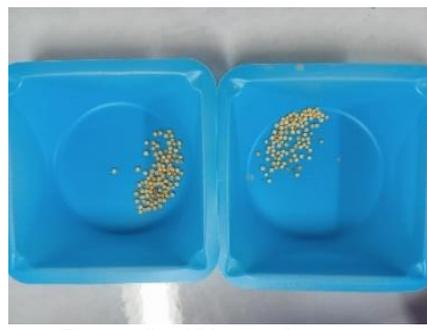


Figura 24. Número de granos



Figura 25. Molido de muestras



Figura 26. Selección de muestras



Figura 27. Peso de materia seca



Figura 28. Peso de papel + muestra



Figura 29. Proceso de destilación



Figura 30. Titulación, determinación de contenido de nitrógeno

Anexo 5. Certificación de traducción del Abstract

08 de diciembre, 2022

Lic. Ángel Darío Jiménez Vera
**LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACION MENCION IDIOMA
INGLES**

CERTIFICA:

Que el documento compuesto es fiel traducción del idioma español al idioma inglés del resumen de tesis titulada: **“Desarrollo de la curva crítica de dilución del nitrógeno para quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) en el sector La Argelia, Loja”** autoría de la Srta. **Gabriela Marisol Jiménez Jiménez** con número de cédula **1105671489** egresada de la carrera de Ingeniería Agronómica de la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables.

Lo certifica en honor a la verdad y autorizo a la interesada hacer uso del presente en lo que a sus intereses convenga


Darío Jiménez V.
ENGLISH TEACHER
REG. 1008-2018-1998231
CHECKED

Lic. Ángel Darío Jiménez Vera
LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACION MENCION IDIOMA INGLES
Registro Senescyt: **1008-2018-1998231**