



Universidad  
Nacional  
de Loja

## Universidad Nacional de Loja

### Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

#### Carrera de Agronomía

**Efecto del anegamiento en diferentes etapas fenológicas sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) var.**

**Excelencia.**

Trabajo de Integración Curricular,  
previo a la obtención del título de  
Ingeniera Agrónoma

**AUTORA:**

María Magdalena Gaona Jiménez

**DIRECTOR:**

Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute, Mg. PhD.

Loja – Ecuador

2025



UNL

Universidad  
Nacional  
de Loja

Sistema de Información Académico  
Administrativo y Financiero - SIAAF

## CERTIFICADO DE CULMINACIÓN Y APROBACIÓN DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

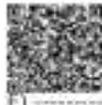
Yo, **VASQUEZ MATUTE SANTIAGO CRISTOBAL**, director del Trabajo de Integración Curricular denominado **Efecto del anegamiento en diferentes etapas fenológicas sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (Chenopodium quinoa Willd.) var. Excelencia**, perteneciente al estudiante **MARIA MAGDALENA GAONA JIMENEZ**, con cédula de identidad N° **1105726341**.

### Certifico:

Que luego de haber dirigido el **Trabajo de Integración Curricular**, habiendo realizado una revisión exhaustiva para prevenir y eliminar cualquier forma de plagio, garantizando la debida honestidad académica, se encuentra concluido, aprobado y está en condiciones para ser presentado ante las instancias correspondientes.

Es lo que puedo certificar en honor a la verdad, a fin de que, de así considerarlo pertinente, el/la señor/a docente de la asignatura de **Integración Curricular**, proceda al registro del mismo en el Sistema de Gestión Académico como parte de los requisitos de acreditación de la Unidad de Integración Curricular del mencionado estudiante.

Loja, 25 de Julio de 2024



SANTIAGO CRISTOBAL  
VASQUEZ MATUTE

DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR



Certificado TIC/TT.: UNL-2024-001319

## **Autoría**

Yo, María Magdalena Gaona Jiménez, declaro ser autora del presente Trabajo de Integración Curricular 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 Integración Curricular, en Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.



**Firma:**

**Cédula de identidad:** 1105726341

**Fecha:** de noviembre de

**Correo electrónico:** maria.m.gaona@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0988749219

**Carta de autorización por parte de la autora, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Integración Curricular.**

Yo, **María Magdalena Gaona Jiménez**, declaro ser autora del Trabajo de Integración Curricular denominado: **Efecto del anegamiento en diferentes etapas fenológicas sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*chenopodium quinoa Willd.*) var. Excelencia**, como requisito para optar por el título de **Ingeniera Agrónoma**, 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 Integración Curricular que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los veinte días del mes de enero del dos mil veinticinco.



**Firma:**

**Autora:** María Magdalena Gaona Jiménez

**Cédula de identidad:** 1105705030

**Dirección:** Loja – Vilcabamba

**Correo electrónico:** maria.m.gaona@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0988749219

**DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director del Trabajo de Integración Curricular:**

Ing. Santiago Cristóbal Vásquez Matute Mg. PhD.

## **Dedicatoria**

Dedico mi trabajo a Dios, por darme la vida y la fuerza necesaria, a mi amada madre Juana Jiménez por ser un apoyo incondicional, quien con su eterna paciencia, amor y sacrificio me permitió lograr una de mis grandes metas y me impulso a ser una gran mujer, a mis hermanos y amistades que creyeron en mí.

***María Magdalena Gaona Jiménez***

## **Agradecimiento**

En primer lugar, agradezco a mi madre por su apoyo infinito para cumplir con mis metas. Agradezco el empeño y paciencia de mi tutor al Dr. Santiago Vázquez por la dedicación, paciencia y apoyo que me ha brindado en este trabajo, y de mis docentes que fueron parte de mi desarrollo universitario, finalmente agradezco a la Universidad Nacional de Loja por haberme permitido alcanzar uno de mis objetivos académicos.

***María Magdalena Gaona Jiménez***

# Índice de contenido

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Certificación</b> .....	<b>ii</b>
<b>Autoría</b> .....	<b>iii</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de contenido</b> .....	<b>vii</b>
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
Índice de anexos.....	xiii
<b>1.Título</b> .....	<b>1</b>
<b>2.Resumen</b> .....	<b>2</b>
Abstract .....	3
<b>3.Introducción</b> .....	<b>4</b>
3.1.Objetivo General .....	6
3.2.Objetivos Específicos.....	6
<b>4.Marco teórico</b> .....	<b>7</b>
4.1.El Cultivo de Quinoa.....	7
4.1.1.Importancia económica .....	7
4.1.2.Calidad nutricional .....	7
4.1.3.Fenología.....	7
4.2.Anegamiento .....	9

5.2.1. Conceptos.....	9
5.2.2. Factores de anegamiento .....	9
5.2.3. Efectos del anegamiento .....	10
4.3. Investigaciones realizadas sobre el anegamiento en otro cultivo.....	13
<b>5. Metodología .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5.1. Localización del estudio.....	14
5.2. Metodología general.....	14
5.2.1. Registro de datos climáticos.....	15
5.2.2. Constantes hidro físicas del sustrato .....	15
5.2.3. Tipo de investigación .....	16
5.2.4. Diseño experimental.....	17
5.2.5. Modelo estadístico .....	18
6.2. Metodología para cada objetivo .....	19
6.2.1 Metodología para el primer objetivo específico. "Describir la respuesta fisiológica al estrés por anegamiento durante el crecimiento y desarrollo de la quinua" .....	19
6.2.2. Metodología para el segundo objetivo. "Cuantificar el impacto del estrés por anegamientos sobre el rendimiento de grano y sus componentes en quinua" .....	20
<b>6. Resultados .....</b>	<b>23</b>
6.1. Constantes hidrofísicas.....	23
6.2. Condiciones climáticas y fenológicas .....	24
6.3. Altura de planta .....	25

6.4. Diámetro de tallo.....	26
6.5. Conductancia estomática de las hojas .....	27
6.6. Contenido relativo de clorofila (unidades de SPAD).....	28
6.7. Fluorescencia de la clorofila .....	29
6.8. Rendimiento y sus componentes.....	31
6.9. Disminución del rendimiento causado por el anegamiento .....	33
<b>7. Discusión .....</b>	<b>35</b>
<b>8. Conclusión .....</b>	<b>40</b>
<b>9. Recomendaciones .....</b>	<b>41</b>
<b>10. Bibliografía.....</b>	<b>42</b>
<b>11. Anexos .....</b>	<b>48</b>

## **Índice de tablas**

<b>Tabla 1.</b> Tratamientos del anegamiento en diferentes fases fenológicas de la quinua variedad Excelencia, basadas en la escala BBCH con su respectivo código .....	<b>17</b>
Tabla 2. Etapas de crecimiento fenológico de la quinua basadas en la escala BBCH .....	<b>19</b>
<b>Tabla 3</b> Constantes hidrofísicas del sustrato y lamina de riego a reponer. ....	<b>23</b>
<b>Tabla 4</b> Rendimiento y repuesta de los componentes del rendimiento de la quinua al anegamiento en diferentes etapas de creciente .....	<b>32</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Etapas de crecimiento fenológico de la quinua según la escala BBCH. ....	<b>9</b>
<b>Figura 2.</b> Ubicación del experimento en el cantón Loja, ciudad de Loja, sector “La Argelia .....	<b>14</b>
<b>Figura 3.</b> Esquema de la implementación del experimento. Los códigos de los dígitos indican los estados fenológicos según la escala de BBCH. El código R (R1-R5) indica el número de repeticiones.....	<b>18</b>
<b>Figura 4.</b> Representación gráfica de la simulación experimental para la comparación del control con los tratamientos.....	<b>19</b>
<b>Figura 5.</b> Curva de retención de humedad del sustrato .....	<b>23</b>
<b>Figura 6.</b> Esquema de las variables climáticas de temperatura (a) y humedad relativa (HR) (b) durante el ciclo de cultivo de quinua bajo condiciones de invernadero.....	<b>24</b>
<b>Figura 7.</b> Duración de las etapas fenológicas de la quinua en cada tratamiento de aplicación de anegamiento. T1: 5 brotes laterales, T2: Inicio del botón floral, T3: Inicio de antesis, T4: Mitad de antesis, T5: Inicio de llenado del grano y T6: Final de lleado de grano .....	<b>25</b>
<b>Figura 8.</b> Altura de planta en diferentes días después de la siembra en función del periodo sometido a anegamiento, las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje x hacen referencia al inicio de anegamiento en cada etapa fenológica, (ns) efecto no significativo y (***) efecto ignificativo.....	<b>26</b>
<b>Figura 9.</b> Diámetro del tallo de las plantas evaluadas cada 15 días, en función del periodo de anegamiento, según las escalas de BBCH del cultivo de quinua, las lieneas verticales de colores ubicadas sobre el eje “x” hacen referencias al inicio del periodo de anegamiento en las diferentes etapas fenológicas, (ns) efecto no significativo y (***) efecto significativo $p < 0,01$ .....	<b>27</b>
<b>Figura 10.</b> Efecto del anegamiento en diferentes momentos del desarrollo vegetal sobre la conductancia estomática de las hojas. Las mediciones se tomaron al termino de los 10 días de estrés, las letras “A” y “B” indican la diferencia significativa $p < 0,001$ . ....	<b>28</b>
<b>Figura 11.</b> Efecto del anegamiento sobre el contenido relativo de la clorofila (SPAD) de la quinua en diferentes etapas fenológicas, el símbolo “****” indica diferencia significativa $p < 0,001$ . Las barras verticales en cada símbolo muestran errores estándar. ....	<b>29</b>

**Figura 12.** Efecto del anegamiento sobre los parámetros fluorescencia de la clorofila en quinua: máxima eficiencia fotoquímica del PSII (Fv/Fm) (a), quenching no fotoquímico (NPQ) (b) y (c), Rendimiento cuántico del fotosistema II (Phi2). Los símbolos “\*\*\*\*” indican diferencia significativa en  $p < 0,001$ , las barras verticales en cada símbolo muestran los errores estándar. .31

**Figura 13.** Efecto del momento del anegamiento sobre el rendimiento en quinua, la línea color rojo horizontal indica el control, los puntos de color azul corresponden al momento donde se aplicó el anegamiento.....34

## **Índice de anexos**

<b>Anexo 1.</b> Descripción de los estados fenológicos de la quinua .....	<b>48</b>
<b>Anexo 2.</b> Regresión lineal entre las lecturas del TDR y la humedad.....	<b>50</b>
<b>Anexo 3.</b> Mezcla de tierra de la Argelia, arena y tierra negra en proporciones 8:1:1 .....	<b>50</b>
<b>Anexo 4.</b> Llenado de fundas .....	<b>51</b>
<b>Anexo 5.</b> Toma de muestras de suelo en cilindros .....	<b>51</b>
<b>Anexo 6.</b> Medición de ph del sustrato.....	<b>52</b>
<b>Anexo 7.</b> Fertilización química de las plantas por maceta .....	<b>52</b>
<b>Anexo 8.</b> Semilla certificada variedad Excelencia.....	<b>53</b>
<b>Anexo 9.</b> Plantas de quinua trasplantadas.....	<b>53</b>
<b>Anexo 10.</b> Plantas anegadas.....	<b>54</b>
<b>Anexo 11.</b> Medición de la altura de las plantas de quinua.....	<b>54</b>
<b>Anexo 12.</b> Medición del SPD de las plantas de quina .....	<b>55</b>
<b>Anexo 13.</b> Fumigación de control para plagas.....	<b>55</b>
<b>Anexo 14.</b> Plagas presentes en el cultivo a. pulgones y b. larva Noctuidae .....	<b>56</b>
<b>Anexo 15.</b> Presencia de raíces adventicias.....	<b>56</b>
<b>Anexo 16.</b> Plantas que no se recuperaron del estrés .....	<b>57</b>
<b>Anexo 17.</b> Eliminación manual de pulgones .....	<b>57</b>
<b>Anexo 18.</b> Medición de humedad con el TDR.....	<b>58</b>

## **1. Título**

**Efecto del anegamiento en diferentes etapas fenológicas sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) var. Excelencia.**

## 2. Resumen

El estrés por anegamiento se ha convertido en un desafío para la agricultura, al ser un factor abiótico que limita el crecimiento el desarrollo y productividad de los cultivos. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del anegamiento en diferentes etapas fenológicas sobre el crecimiento y rendimiento en quinua. Se realizó un experimento bajo condiciones de invernadero utilizando macetas, las mismas que fueron anegadas completamente por 10 días, los tratamientos se aplicaron en seis estadios fenológicos, iniciando desde la formación de brotes laterales finalizando en el inicio de llenado de grano. El estrés por anegamiento disminuyó el desempeño fisiológico, crecimiento y productividad de las plantas, siendo más crítico cuando el anegamiento coincidió con la etapa antesis e inicio de llenado de grano. A nivel fisiológico el anegamiento disminuyó la conductancia estomática, el contenido relativo de clorofila (SPAD), la máxima eficiencia fotoquímica del fotosistema II (Fv/Fm) y el rendimiento cuántico efectivo del fotosistema II ( $\Phi$ PSII). El rendimiento del grano disminuyó significativamente en todos los momentos en los que se aplicó, aunque las mayores penalizaciones se produjeron cuando el anegamiento se aplicó en inicio de antesis y llenado de grano provocando reducciones de hasta 100 % por la muerte de las plantas. En los demás momentos el rendimiento cayó desde 56 % hasta 80 %, esto debido a la pérdida de biomasa aérea, el número de granos, peso de grano e índice de cosecha. En conclusión, el anegamiento afecta el crecimiento y rendimiento de la quinua, cuando el estrés es aplicado desde la etapa vegetativa hasta el establecimiento de los granos.

*Palabras claves: Quinua, estrés, exceso hídrico, fisiología*

## **Abstract**

Water stress has become a challenge for agriculture, as it is an abiotic factor that limits crop growth, development and productivity. The objective of this study was to evaluate the effect of waterlogging at different phenological stages on growth and yield in quinoa. An experiment was conducted under greenhouse conditions using pots, which were completely flooded for 10 days. The treatments were applied at six phenological stages, starting from the formation of lateral buds and ending at the beginning of grain filling. Waterlogging stress decreased plant physiological performance, growth and productivity, being more critical when waterlogging coincided with the anthesis stage and the beginning of grain filling. At the physiological level, waterlogging decreased stomatal conductance, relative chlorophyll content (SPAD), maximum photosystem II photochemical efficiency (Fv/Fm) and photosystem II effective quantum yield ( $\Phi$ PSII). Grain yield decreased significantly at all times when it was applied, although the greatest penalties occurred when waterlogging was applied at anthesis initiation and grain filling causing reductions of up to 100 % due to plant death. At the other times, yields dropped from 56 % to 80 %, due to the loss of aerial biomass, number of grains, grain weight and harvest index. In conclusion, waterlogging affects the growth and yield of quinoa, when stress is applied from the vegetative stage to grain establishment.

**Keywords:** Quinoa, stress, excess water, physiology.

### 3. Introducción

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es considerada un alimento de mucha importancia debido a su valor nutricional, los granos de quinua poseen la mayoría de los aminoácidos esenciales, oligoelementos y un gran equilibrio y balance de proteínas, grasas y carbohidratos, además es rico en fibra, minerales y vitaminas (Pinto Mena, 2013), convirtiéndolo así en un cultivo que aporta a la seguridad alimentaria mundial (FAO, 2011). Debido a su variedad genética la cual permite desarrollar variedades superiores, tiene la capacidad de adaptabilidad a diferentes regiones agroecológicas. En Ecuador la quinua es cultivada en áreas de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Chimborazo y Loja (Peralta, 2009). La reciente variedad de Quinua INIAP-Excelencia tiene importantes beneficios los cuales son su precocidad ya que presenta su crecimiento en 145 días, produce 1.838 kilogramos por hectárea, contiene un 17,9 % de proteína, es resistente a la enfermedad del mildiu y tiene una menor altura de planta que otros tipos de quinua, lo que reduce el volcamiento de plantas en épocas de vientos (MAG, 2023).

Las predicciones en el cambio de patrón e intensidad de las lluvias pronostican inundaciones en varias partes del mundo, pues para el caso de los Andes especialmente en la parte norte y con más frecuencia en la altitud, a esto se estima que el 13 % de las tierras de América Latina se caracterizan por un drenaje deficiente debido a su fisiografía que propicia la inundación (Fischer, 2021), lo que podría provocar exceso en la oferta hídrica afectando negativamente a los cultivos, el estrés por anegamiento o inundación de las plantaciones se ha convertido en un factor abiótico limitante del crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos (Carvajal, 2014)

En Ecuador, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) registró en abril de 2023 más de 8.273 hectáreas de superficie agrícola con pérdida total debido a las fuertes lluvias e inundaciones. El anegamiento en las diferentes zonas del Ecuador se mostrará de manera más evidente por el cambio climático, que afecta a la gran mayoría de cultivos incluyendo la quinua, que a pesar de ser considerado un cultivo versátil se recomienda evitar su propagación en suelos poco drenados o con problemas de inundación pues afectan el establecimiento inicial del cultivo y pueden ocasionar la podredumbre radicular a lo largo del ciclo (FAO, 2016).

Investigaciones realizadas por González et al. (2009) atestiguan que las plantas de quinua respondieron de manera diferente a la sequía y al anegamiento. Los pesos secos (PS) de plantas y raíces fueron menores tanto en condiciones de sequía como de anegamiento que en condiciones

de buen riego, pero los valores más bajos se obtuvieron en condiciones de anegamiento. Por el contrario, el peso específico de las hojas (SLW) y el contenido relativo de agua (RWC) fueron mayores en condiciones de anegamiento que en condiciones de sequía. El menor contenido de clorofila total, clorofila a y clorofila b se observó en condiciones de anegamiento, en este estudio se indica que el excedente de agua del suelo constituye un factor limitante para el crecimiento de la quinua.

Actualmente, no existen estudios que demuestren el impacto del estrés por exceso hídrico en este cultivo y las etapas fenológicas más vulnerables, con el objetivo de proporcionar una comprensión más clara de los efectos del anegamiento en diferentes etapas de crecimiento y rendimiento de la quinua, especialmente para los agricultores de la provincia de Loja en la sierra ecuatoriana, es necesario desarrollar estrategias para determinar la etapa más sensible al anegamiento. Esta información es crucial para el manejo agronómico enfocado en mitigar estas afectaciones y optimizar el rendimiento del cultivo.

### **3.1.Objetivo General**

Evaluar el efecto del anegamiento en diferentes etapas fenológicas sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) var. Excelencia.

### **3.2.Objetivos Específicos**

- Describir la respuesta fisiológica al estrés por anegamiento durante el crecimiento y desarrollo de la quinua
- Cuantificar el impacto del estrés por anegamientos sobre el rendimiento de grano y sus componentes en quinua

## 4. Marco teórico

### 4.1.El Cultivo de Quinua

#### 4.1.1.Importancia económica

La organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) declaró en 2013 como el año internacional de la quinua. La quinua se constituye en un cultivo estratégico para el aporte de la seguridad y soberanía alimentaria debido a: su calidad nutritiva, su amplia variabilidad genética, su adaptabilidad y su bajo costo de producción.

#### 4.1.2. Calidad nutricional

Según la FAO, el valor nutricional de la quinua ha sido notable por su proteína de alta calidad, particularmente rica en aminoácidos esenciales y por su contenido de carbohidratos, produciendo bajos índices de glicemia y en general una mejor calidad nutricional y funcional respecto a granos de cereales tales como maíz, avena, trigo y arroz.

#### 4.1.3. Fenología

Etapas de crecimiento de quinua según la escala BBCH, expuesta por (Sosa Zúñiga *et al.*, 2017).

##### **Estadio 0: germinación**

El estadio 0 se evidencia la germinación de la semilla. La germinación de la semilla es epigráfica, seguida de la aparición del hipocótilo (estadio 07) y del hipocótilo con los cotiledones que crecen hasta la superficie (estadio 08), finalizando la etapa.

##### **Estadio 1: desarrollo de la hoja**

Se visualiza la aparición de las hojas fotosintéticamente activas en el brote principal. Las mismas que emergen en pares, se considera que un par de hojas es visible cuando los dos limbos de la hoja se separan uno del otro. Esta etapa inicia cuando se separan los cotiledones entre ellos (estadio 10). El primer par de hojas fotosintéticas visibles se codifica como estadio 11.

##### **Estadio 2: formación de brotes laterales**

En este estadio se muestra la formación de los brotes laterales. La aparición de brotes laterales puede iniciar antes o después de la emergencia de la inflorescencia. Un brote lateral se considera visible cuando muestra 1 cm o más de longitud.

##### **Estadio 5: emergencia de la inflorescencia**

El estadio 5 se muestra el desarrollo de la inflorescencia sobre el tallo principal. La aparición de la inflorescencia se produce antes de terminar la etapa de desarrollo de las hojas en el

tallo principal. Al inicio, las yemas de la inflorescencia están envuelta por hojas jóvenes y no son observables (estadio 50). Esta etapa concluye cuando la inflorescencia queda expuesta sin hojas que la cubran (etapa 59).

#### **Estadio 6: floración**

En esta etapa se describe el desarrollo de las flores dentro de la inflorescencia. La floración comienza cuando las primeras anteras son visibles (estadio 60). Cuando todas las anteras visibles de la inflorescencia principal mueren se considera completa (estadio 69).

#### **Estadio 7: desarrollo del fruto**

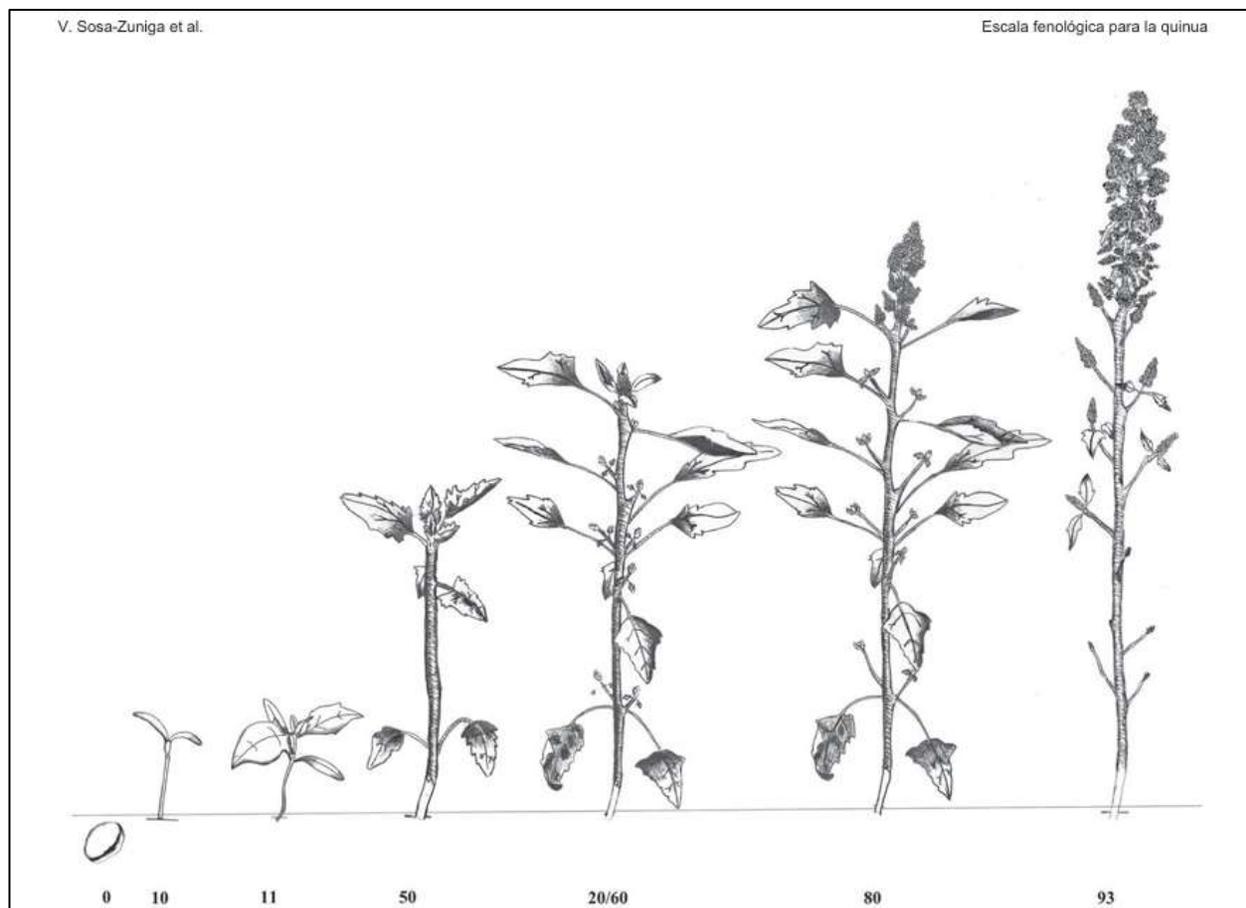
El estadio 7 describe el desarrollo del fruto en el tallo principal. El desarrollo de los frutos empieza con el cuajado de los mismos (estadio 70), que se define como el engrosamiento del ovario y la presentación de los primeros granos visibles.

#### **Estadio 8: maduración.**

El estadio 8 describe la maduración de los granos. Durante este proceso de maduración, el contenido de agua del aquenio varía, cambiando su textura y el color del pericarpio, que pasa de verde a beige, rojo o negro (estadios 81), en el que el grano se considera lechoso, pastoso (etapa 85) y maduro (etapa 89).

#### **Estadio 9: senescencia**

En esta etapa se describe la senescencia que empieza en las hojas basales (estadio 91) y continúa hacia arriba, pero el tallo permanece verde (estadio 93). Posteriormente las hojas basales mueren y el tallo pasa de amarillo a marrón (etapa 95). Para finalizar, toda la planta muere y se seca (etapa 97), y los granos pueden ser cosechados (etapa 9).



**Figura 1.** Etapas de crecimiento fenológico de la quinua según la escala BBCH.

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

## 4.2. Anegamiento

### 5.2.1. Conceptos

Según Moreno & Fischer (2014) definen al anegamiento como la inundación de un terreno agrícola ya sea por un aumento del nivel freático (capa superior del agua subterránea) o por una irrigación excesiva.

El anegamiento es un estrés ambiental común en áreas propensas a altas precipitaciones, drenaje deficiente del suelo y altas fluctuaciones del nivel freático, lo que influye en la supervivencia, el crecimiento y la productividad de los cultivos Kozlowski, (1997)

### 5.2.2. Factores de anegamiento

El anegamiento ocurre principalmente en zonas donde existen lluvias excesivas durante las épocas de crecimiento, características propias de climas tropicales y sub tropicales (Shao, 2013)

### **Factores climáticos**

El clima define la distribución y productividad de los cultivos a nivel mundial, a partir de variables tales como radiación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y pluviometría. Esta última es relevante en la ocurrencia de eventos de anegamiento, asociados a la intensidad y distribución temporal de las precipitaciones (Alduce & González, 2009).

Sin embargo, en ecosistemas con climas mediterráneos también se pueden generar las condiciones para la ocurrencia de este estrés (Ramos Pérez & Marañón, 2009)

### **Factores edáficos**

Se ha visto que la topografía es un componente importante para el desarrollo del anegamiento, desde el punto de vista de Manjunatha *et al.* (2004) quienes demostraron que en zonas bajas se aumenta el riesgo de presentar dicho estrés.

Los valores bajos de densidad aparente son propios de suelos porosos, bien aireados, con buen drenaje y buena penetración de raíces, lo que permite un buen desarrollo de las raíces. Los valores altos de densidad aparente son propios de suelos compactos y poco porosos, con aireación deficiente e infiltración lenta del agua, lo cual puede provocar anegamiento (Rubio Gutiérrez , 2010).

### **Factores del cultivo**

De acuerdo con Romero *et al.* (2016) la evapotranspiración del cultivo es un mecanismo valioso puesto que determina el movimiento del agua desde el suelo hacia la atmósfera, devolviendo más del 60 % del agua precipitada. Este proceso varía en función de los factores climáticos (radiación, temperatura, humedad atmosférica y velocidad del viento), de manejo (fertilización, control de plagas y enfermedades, riego, densidad de siembra, entre otros) y del cultivo (especie, variedad y etapa de desarrollo), siendo inferior en las primeras etapas del cultivo y en periodos de bajas temperaturas. Cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, las estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta (López López *et al.*, 2009).

#### **5.2.3. Efectos del anegamiento**

##### **Efectos fisiológicos**

La inundación del suelo induce múltiples disfunciones fisiológicas en plantas. La fotosíntesis y el transporte de carbohidratos son inhibidos. La absorción de macronutrientes disminuye en plantas inundadas debido a la mortalidad de las raíces, la pérdida de micorrizas, y

supresión del metabolismo de las raíces. La inundación del suelo altera equilibrios hormonales en las plantas, generalmente aumentando la proporción de etileno (Kozlowski, 1997).

Según lo mencionado por Romero *et al.* (2016) el efecto básico del anegamiento es la limitación en la tasa respiratoria de las células de las raíces. La inundación reduce la concentración de oxígeno disponible (hipoxia) y obstruye la captación de energía luminosa en las hojas. La hipoxia ocurre cuando la concentración de oxígeno en el ambiente celular es inferior a la condición normóxica (21% O<sub>2</sub>, p/p) (Bailey-Serres y Voisenek, 2008; Lee *et al.* 2011), causando así una severa crisis energética en las plantas al disminuir o limitar la eficiencia de las rutas aeróbicas de síntesis de ATP (ciclo de los ácidos tricarbónicos y cadena de transporte de electrones) (Branco-Price *et al.*, 2008; Bailey-Serres *et al.*, 2012).

El anegamiento induce efectos adversos en varios procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas al crear una deficiencia de nutrientes esenciales como nitrógeno, magnesio, potasio y calcio, las plantas que crecen en condiciones de inundación también exhiben ciertos cambios morfológicos que implican la formación de raíces adventicias, el inicio de lenticelas hipertrofiadas y/o el establecimiento de aerénquima (Ashraf, 2012).

Los síntomas del estrés por inundación abarcan la clorosis, retraso en el crecimiento, necrosis de tejidos y pueden llegar a ocasionar la muerte. Aun cuando el estrés finalice antes de ocasionar la muerte, el retraso en el crecimiento y el daño a los tejidos hacen que la planta que lo sufrió continúe con inconvenientes con respecto a las que no lo tuvieron que enfrentar (Peña, 2014)

### **Fotosíntesis**

La fotosíntesis es un proceso fotoquímico por el cual las plantas, algas y bacterias fotosintéticas usan la radiación solar transformándola en energía química para aprovecharla en la síntesis de compuestos orgánicos a través de sustancias inorgánicas como minerales, agua y CO<sub>2</sub> (Muñoz, 2024).

En plantas y algas, la fotosíntesis tiene lugar en organelos llamados cloroplastos. Dentro de los cloroplastos se encuentran los fotosistemas constituidos por una red de moléculas de clorofila-a, pigmentos accesorios y proteínas asociadas. La luz colectada por los fotosistemas es transferida a sus respectivos centros de reacción que están formados por un par de 2 moléculas de clorofila-a Ospina Calvo, (2018).

En las plantas, las moléculas de clorofila a asociadas a los fotosistemas I y II (PSI, PSII) son las encargadas de la emisión de la fluorescencia. Las características cinéticas de la reacción de la

fluorescencia emitida son determinadas por la intensidad luminosa de excitación, la concentración de pigmentos que absorben la luz, la transferencia de la energía de excitación, la naturaleza y orientación de los pigmentos fluorescentes, el estado redox de aceptores y donadores del PSII, el apilamiento de los tilacoides y la translocación de protones, entre otros (Moreno González *et al.*, 2008).

### **La fluorescencia como indicador de estrés**

El cierre estomático se convierte en una de las primeras y más primordiales respuestas de la planta cuando está sometida a condiciones de estrés. La fluorescencia puede ser empleada como herramienta para obtener información acerca de la influencia del estrés sobre el estado fisiológico del aparato fotosintético de las plantas y su respuesta será indicadora del daño o alteraciones en él (Jiménez Suancha *et al.*, 2015).

La emisión de fluorescencia puede ser medida como indicador del rendimiento cuántico del fotosistema II y la existencia de fotoinhibición de la fotosíntesis debido a su disminución,  $F_v/F_m$  se utiliza mayormente para determinar si un tratamiento de estrés tiene un efecto en la planta (Muñoz & Hernandez, 2016).

### **Efectos en el rendimiento**

Las plantas sometidas a anegamientos sufren importantes pérdidas de rendimiento. En condiciones ambientales naturales, las plantas suelen quedar expuestas a anegamientos transitorios o permanentes (Ashraf, 2012). San Celedonio *et al.* (2014) determinaron que la magnitud de la reducción del rendimiento en grano de trigo producto del anegamiento varía de acuerdo al estado de desarrollo del cultivo. Por un lado, Shao *et al.* (2013) establecieron que un anegamiento de 3 días disminuye significativamente el rendimiento en grano de trigo cuando el evento ocurre en cualquier etapa de crecimiento del cultivo, comparado con plantas desarrolladas en suelo bien drenado, observándose una reducción de 10,2 % si el anegamiento ocurre en macollaje, 8,2 % en estado de bota, 11,3 % en floración y 5,6 % en llenado de grano, debido a diferentes alteraciones a los componentes del rendimiento.

Macedo & Terra (2014) mencionan que: la inundación durante tres días en el estadio V2-V3 provocaron reducciones del 20 % en el rendimiento de chacras comerciales de soja.

En el cultivo de girasol los resultados mostraron una disminución lineal de la producción de granos a medida que aumentaron las horas de inundación en el cultivo, la época de siembra no influyó en el efecto de los días de inundación sobre el rendimiento y en ambos casos se pierde el

0,5 % de rendimiento por cada hora de inundación, se alcanzó una pérdida de un 50 % de producción de granos frescos a las 36 horas de exceso de humedad (Cun González *et al.*, 2018).

#### **4.3. Investigaciones realizadas sobre el anegamiento en otro cultivo**

En un estudio realizado por Perdomo *et al.* (2022) utilizando un diseño experimental donde los tratamientos consistieron en inundar las macetas durante 24, 48, 96 y 144 horas con un testigo sin inundar. Los resultados revelaron que, desde el comienzo de la inundación, ocurrió una reducción en la producción relativa de granos de 0,31 % por cada hora de inundación y se alcanzó una pérdida de 50 %, aproximadamente, con 70 horas de exceso de humedad. Las plantas presentaron pérdidas en el peso de las mazorcas de maíz, de los granos y una disminución en la longitud de la mazorca, cuando fueron sometidas a la inundación desde 24 horas hasta 144 horas.

El estudio de Shao *et al.*, (2013) demostró que el anegamiento en la etapa inicial de crecimiento podría reducir el crecimiento de los brotes y las raíces del trigo. En comparación con el control, los tratamientos de anegamiento en las etapas de macolla miento y unión-arranque redujeron significativamente la tasa fotosintética (PN) y la transpiración (E), también disminuyeron la eficiencia promedio del uso del agua de las hojas (WUE, definida como la proporción de PN a E) en 3.3 % y 3,4 % en ambos años.

## 5. Metodología

### 5.1. Localización del estudio

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en el invernadero de la carrera de Agronomía de la Universidad Nacional de Loja, cantón Loja de la provincia de Loja, el invernadero se encuentra ubicado en las coordenadas geográficas  $4^{\circ}02'07''S$   $79^{\circ}12'12''W$ . (Figura 2)



**Figura 2.** Ubicación del experimento en el cantón Loja, ciudad de Loja, sector “La Argelia

### 5.2. Metodología general

Dentro del invernadero se establecieron plantas en fundas de polietileno de 30 cm x 41 cm, como en estudios realizados por Aldana *et al.* (2014); Garcia *et al.* (2020), se elaboró un sustrato de tierra de la estación experimenta la Argelia, arena y tierra negra en proporciones 8:1:1. Las semillas que se utilizaron fueron de la variedad Excelencia obtenidas por el INIAP Estación Experimental Santa Catalina Quito. Para la siembra de las semillas se realizó un semillero luego se hizo un trasplante.

Se realizó un monitoreo constante para evitar la presencia de plagas y enfermedades, y se hizo un control preventivo, se usó *Bacillus turgiensis*, y extracto de neem, en proporciones de 1 cc por litro de agua y 2 cc por litro de agua, respectivamente.

Las plantas se fertilizaron tomando en cuenta los análisis químicos realizados en la quinta experimental en el cual se obtuvieron los siguientes resultados (pH: 5,24; M.O: 2,16 %; N: 69,64 ppm; P: 32 ppm; K: 0,2 meq/100g; Ca: 2,97 meq/100g; Mg: 0,67 meq/100g; Fe: 415 ppm; Mn: 22,8 ppm; Cu: 5,4 ppm y Zn: 7,5 ppm, y según las necesidades del cultivo (N: 150, P: 80, K:70) como estudios previos de Basantes et al.,(2015) y Ulloa et al., (2021). Se proporcionó una fertilización a base de urea (46 % N), muriato de potasio (40 % K<sub>2</sub>O) y fosfato diamónico (18 % N: 46 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) con una dosis de 1.8 g, 1 g, y 1,15 g respectivamente por maceta en 2 aplicaciones por ciclo de cultivo.

### **5.2.1. Registro de datos climáticos**

Para los registros de los datos de temperatura y humedad relativa se llevó un registro cada hora a lo largo del ciclo del cultivo mediante el uso de un termo graficador Elitech modelo 40550 el cual se ubicado dentro del invernadero.

### **5.2.2. Constantes hidro físicas del sustrato**

Con el sustrato preparado, se dispusieron de tres bolsas adicionales de las cuales se tomaron tres muestras no disturbadas utilizando cilindros Koppecky de 100 cm<sup>3</sup> de capacidad. Estas muestras fueron llevadas al laboratorio de suelos y Aguas del Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables con el objetivo de determinar la curva del pF o retención de humedad y se determinó la densidad aparente del sustrato utilizando la siguiente formula:

$$Da = \frac{P_{ss}}{V_c}$$

Donde

Da: Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>)

Pss: Peso del suelo seco (g)

Vc: volumen del contenedor

Para determinar los puntos de la curva se empleó la técnica de la olla a presión desarrollada por Richards (1949), obteniendo datos de Saturación a pF = 0, pF= 2,00; pf=2,52 capacidad de campo (CC) a una solución de 1/3, y pf = 4,20 punto de marchitez permanente (PMP). Con estos valores se elaboró la respectiva curva de retención de humedad del sustrato, con ello se determinó la capacidad de aireación, agua aprovechable

y el volumen de los poros inertes del sustrato. Esta curva describe la relación entre el potencial hídrico del suelo (eje Y) y el contenido volumétrico de humedad (eje X).

Además, se tomaron muestras de las bolsas y se colocaron en fundas plásticas debidamente etiquetadas, estas también fueron llevadas al laboratorio para determinar textura.

Una vez con los datos obtenidos se realizó una calibración para la sonda de humedad TDR (medidor de humedad) para el tipo de textura del sustrato, para ello se utilizó un recipiente lleno del sustrato el mismo que desde la saturación hasta el PMP, se determinó la humedad del sustrato con el TDR cada 24 horas y se tomó una muestra gravimétrica la cual fue llevada al horno a  $\pm 105$  grados por 24 horas, este procedimiento se repitió hasta llegar a PMP (Martis, 2017).

Una vez obtenidos todos los puntos se realizó un gráfico de dispersión de puntos colocando los datos del sensor en el eje X y el en eje Y la humedad del suelo en términos de volumen. Posteriormente se realizó la regresión lineal entre las lecturas del TDR y la humedad determinada por el método gravimétrico para obtener la ecuación de ajuste de calibración del sensor para el sustrato (ver anexo 2)

Con la información de las constantes hidro físicas del sustrato y con la ecuación de ajuste del sensor, una vez que las plantas salieron de los tratamientos anegamiento se monitoreo hasta determinar el tiempo al que llego a CC, y a partir de ese momento se inició el manejo del riego.

Finalmente, con toda la información recopilada se determinó los criterios de riego, decidiéndose trabajar con un umbral de riego del 30 % como lo recomienda López-Olivari, (2019). Esto permitió que, al finalizar el tratamiento de saturación, se monitoreara mediante el TDR 150 el contenido de humedad del suelo hasta alcanzar la capacidad de campo. Una vez que las plantas presenten un nivel de agotamiento del 30 % de agua aprovechable, se repuso la cantidad necesaria para volver a capacidad de campo asegurando que la planta tenga contenidos adecuados de oxígeno y agua disponible.

### ***5.2.3. Tipo de investigación***

La investigación es de tipo experimental con un enfoque cuantitativo y un alcance causal-comparativo, debido a que se implementó un diseño con distintos

tratamientos en los que se pretende manipular intencionalmente las variables independientes, para examinar los resultados de estas manipulaciones sobre las variables dependientes, se registraron datos numéricos los cuales serán analizados estadísticamente.

#### 5.2.4. *Diseño experimental*

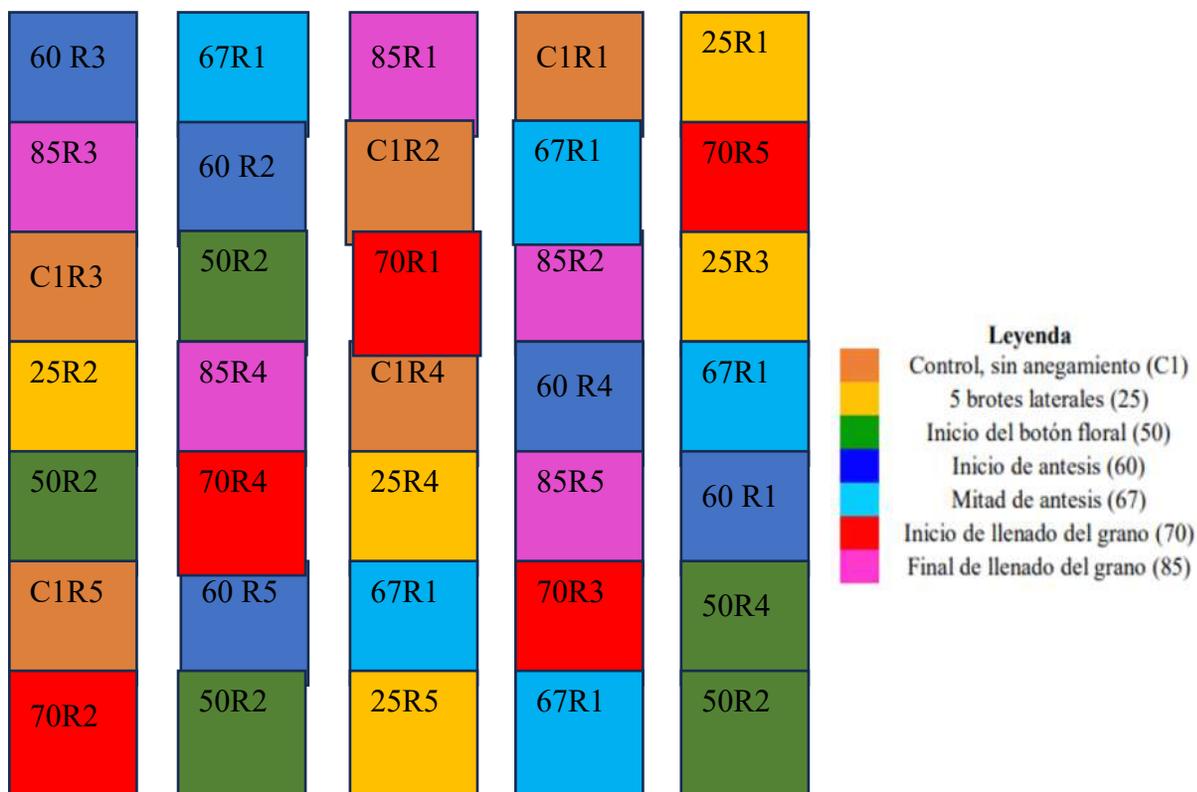
Los tratamientos se ubicaron siguiendo un diseño completamente al azar (DCA) (Figura 3) donde el factor es el anegamiento con 7 tratamientos y 5 repeticiones dándonos un total de 35 unidades experimentales, donde cada unidad experimental corresponde a una planta (1 maceta). Los tratamientos fueron: un control bien drenado durante todo el ciclo del cultivo y 6 tratamientos de anegamiento (Tabla 1) aplicado en diferentes etapas fenológicas, siguiendo la escala BBCH (Sosa Zuñiga *et al.* 2017)

La duración de cada tratamiento de anegamiento fue de 10 días, para simular el anegamiento se usó balde plástico donde se introdujo las macetas se los llenó de agua hasta 1 cm de agua sobre la superficie de la funda como en un estudio realizado por (Ding y otros, 2020) y permanecieron los 10 días. (Figura 4)

**Tabla 1.** Tratamientos del anegamiento en diferentes fases fenológicas de la quinua variedad Excelencia, basadas en la escala BBCH con su respectivo código

Tratamiento de anegamiento	Código	
	BBCH	DDS
Control, sin anegamiento	(C1)	.....
5 brotes laterales	(25)	51
Inicio del botón floral	(50)	53
Inicio de la antesis	(60)	82
Mitad de la antesis	(67)	104
Inicio del llenado de grano	(70)	107
Final del llenado del grano	(85)	122

El parámetro DDS significa los días después de la siembra es decir el tiempo que demora el cultivo para llegar a cada etapa fenológica.



**Figura 3.** Esquema de la implementación del experimento. Los códigos de los dígitos indican los estados fenológicos según la escala de BBCH. El código R (R1-R5) indica el número de repeticiones.

### 5.2.5. Modelo estadístico

Considerando que se utilizará un DCA, se empleó el siguiente modelo

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

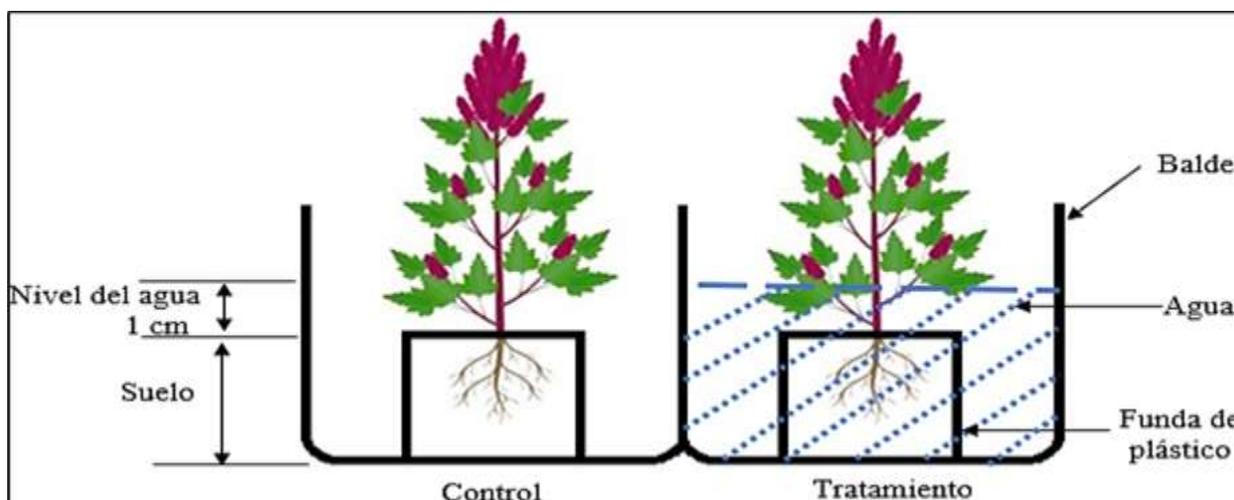
Donde:

$Y_{ij}$  Variable respuesta

$\mu$  Media general común a todos los tratamientos

$\tau_i$  Efecto del factor anegamiento

$\varepsilon_{ij}$  Error experimental



**Figura 4.** Representación gráfica de la simulación experimental para la comparación del control con los tratamientos. Tomado de (Murquincho, y Vázquez 2023)

## 6.2. Metodología para cada objetivo

### 6.2.1 Metodología para el primer objetivo específico. “Describir la respuesta fisiológica al estrés por anegamiento durante el crecimiento y desarrollo de la quinua”

Para cumplimiento del primer objetivo se midieron en todos los tratamientos con sus repeticiones y el control. Para las variables contenido de clorofila, conductancia estomática y fluorescencia de clorofila se tomó una planta del centro de cada unidad experimental, las variables fueron tomadas al finalizar el anegamiento, seguidamente se detallará las variables a medir

#### ➤ Seguimiento de la fenología y duración de las etapas fenológicas:

Se llevo un control de las etapas fenológicas de la quinua utilizando como referencia la estala elaborada por Sosa et al. (2017) basada en la escala de BBCH, para la determinación del estado fenológico, se registró los cambios fenológicos semanalmente, desde la germinación hasta la senescencia, se registró la duración de cada estado fenológico cuando el 50 % de todas las plantas lleguen a cada etapa (Tabla 2).

**Tabla 2** Etapas de crecimiento fenológico de la quinua basadas en la escala BBCH

Código	Descripción
0	Germinación
1	Desarrollo de las hojas
2	Formación de brotes laterales
3	Enloganción del tallo

4	partes vegetativas cosechables
5	Emergencia de la florecencia
6	Floración
7	Desarrollo del fruto
8	Fruto maduro
9	Senescencia

---

➤ **Conductancia estomática de las hojas:**

Para la determinación de la conductancia estomática se utilizó un porómetro (SC-1 de Meter Group), para ello del tercio superior de la plata a evaluar se tomó dos hojas completamente expandidas que no presente síntomas o daños ni bióticos o abióticos y que este bien iluminada, como en un estudio realizado por Noguera et al. (2020), por cada unidad experimental.

➤ **Contenido relativo de clorofila (índice de SPAD):**

Para la realización de este punto se utilizó el Medidor de Fotosíntesis Portátil Photosynq llamando MultispeQ V2. el cual ser conectado con un teléfono inteligente mediante bluetooth, para ello se tomaron dos hojas jóvenes completamente extendidas del tercio superior de tres macetas por unidad experimental, a excepción de las macetas que salieron de anegamiento que se midió todas las hojas.

➤ **Fluorescencia de la clorofila:**

Para la determinación de la fluorescencia se utilizó un fluorometro portátil llamado MultiseQ v2.0. el cual se conectó con un teléfono inteligente mediante bluetooth, las mediciones se realizaron al medio día al final de cada tratamiento de anegamiento para esto se tomaron dos hojas por plata del tercio superior de cada unidad experimental, así se registraron las siguientes variables de rendimiento cuántico efectivo del fotosistema II ( $\Phi$ PSII), máxima eficiencia fotoquímica del PSII (Fv/Fm) (fluorescencia de la clorofila) y el quenching no fotoquímico (NPQ) (Fernández-Calleja y otros, 2024)

**6.2.2. Metodología para el segundo objetivo. "Cuantificar el impacto del estrés por anegamientos sobre el rendimiento de grano y sus componentes en quinua"**

La evaluación de todas las variables se llevó a cabo al final de la cosecha, se midieron todos los tratamientos con sus repeticiones y el control el día de las evaluaciones, a excepción de la altura

de la planta y el diámetro el cual se midió cada 15 días. A continuación, se detallan las variables a medidas

➤ **Altura de la planta**

Se tomaron las medidas en centímetros del tallo principal desde la base hasta el ápice de la panoja, con la ayuda de un flexómetro, cada 15 días, de todas las macetas de cada tratamiento.

➤ **Diámetro del tallo**

Se tomaron las medidas en centímetros de la parte inferior del tallo con la ayuda de un calibrador, cada 15 días, de todas las macetas de cada tratamiento.

➤ **Biomasa aérea**

Para ello fue necesario cortar las plantas a nivel del suelo, utilizar bolsas de papel y dejar secar al horno por tres días a 65 °C, luego fueron pesadas en una balanza para poder tener la biomasa total en gramos, esta medición se realizó en madurez fisiológica.

➤ **Número de granos**

Para calcular el número de granos fue necesario el uso de las panojas previamente secadas en el horno, las cuales fueron trilladas, se pasaron por un cedazo y por una máquina de limpieza, se pesaron el total de granos que se obtiene por panoja, luego se pesó 50 granos con el objetivo de estimar el número total para las unidades experimentales.

➤ **Peso de granos**

Se pesó una muestra de 100 granos por cada unidad experimental y con una regla de tres se estimó el peso de 1000 granos.

➤ **Rendimiento**

Para ello se calculó el rendimiento en base seca, se determinó el número de granos por planta y el peso promedio del grano, con el fin de obtener el rendimiento se utiliza la siguiente fórmula

$$R = NG \text{ planta}^{-1} * PG$$

Donde:

$R$  = rendimiento

$NG \text{ planta}^{-1}$  = número de granos por planta

$PG$  = peso promedio de granos

➤ **Índice de cosecha (IC)**

Se utilizo datos de biomasa y el rendimiento de las unidades experimentales y se aplicó la siguiente fórmula:

$$IC = \frac{\text{Rendimiento de grano} \times \text{planta}^{-1}}{\text{biomasa aerea total} \times \text{planta}^{-1}}$$

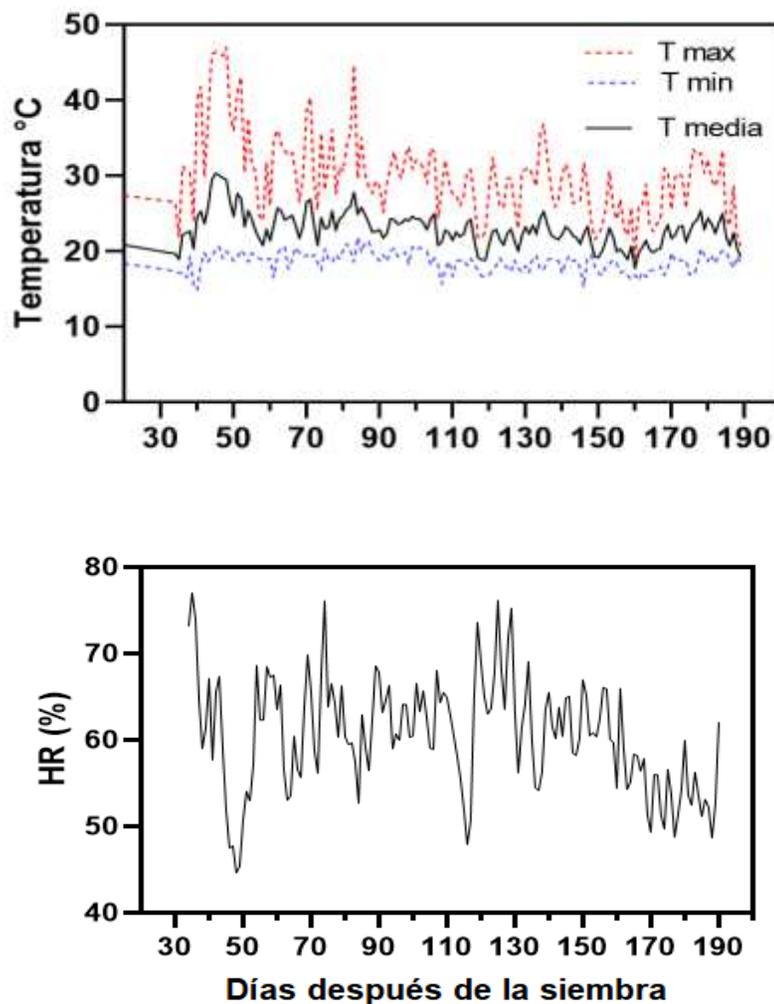
#### 7.8. Análisis estadístico

Los datos fueron tabulados en Microsoft Excel para el análisis estadístico con ayuda del programa Infostat versión estudiantil se realizó un análisis de comprobación de supuestos estadísticos de independencia de las observaciones, normalidades y homogeneidad de varianza, posteriormente se hizo un análisis de varianza (ANOVA) ( $p < 0,05$ ) se determinó si existe o no, diferencias significativas entre los tratamientos, y después se serializó una prueba de TUKEY (nivel de confianza: 95 %).



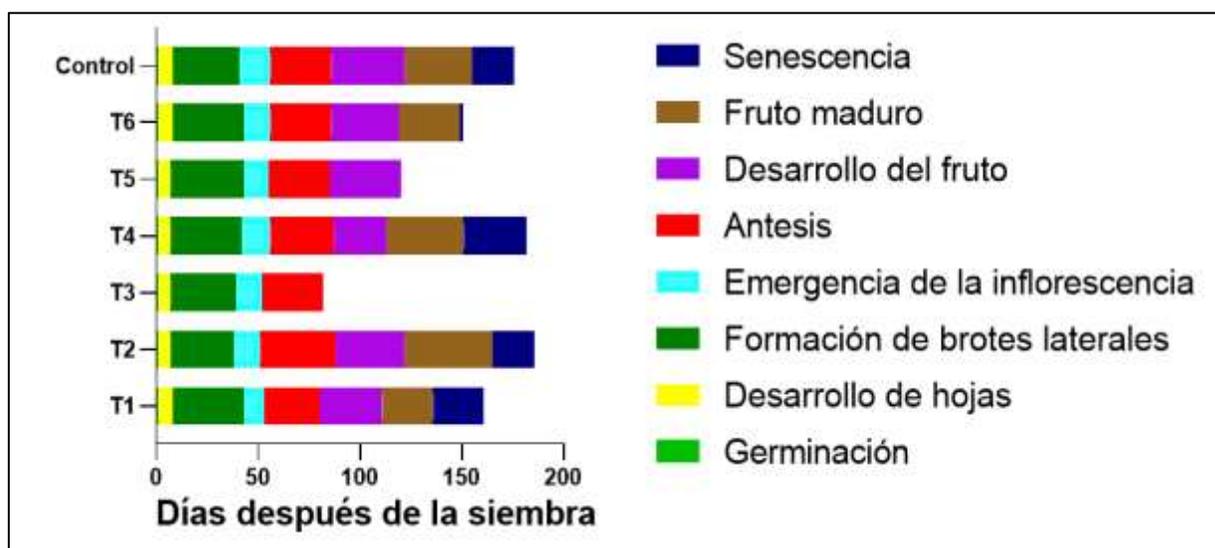
## 6.2. Condiciones climáticas y fenológicas

La Figura 6 se muestra los valores de temperatura media, máxima y mínima, así como la humedad relativa durante las diferentes etapas fenológicas de la quinua. La temperatura media durante el ciclo del cultivo fue de  $22.97^{\circ}\text{C}$ . En el día 43 hasta el día 48 después de la siembra hubo un incremento de la temperatura durante la fase de formación de brotes laterales, alcanzando la temperatura más alta de  $47,9^{\circ}\text{C}$  a los 48 DDS, por otro lado, se registró la temperatura más baja de  $14^{\circ}\text{C}$  se presentó a los 40 DDS. La humedad relativa más baja ( $44.5\%$ ) ocurrió a los 48 días durante la formación de brotes laterales. Por lo contrario la humedad relativa más alta ( $77\%$ ) se presentó a los 35 DDS en la fase fenológica de formación de brotes laterales y a los 74 DDS ( $76.1$ ) durante el desarrollo de frutos.



**Figura 6.** Esquema de las variables climáticas de temperatura (a) y humedad relativa (HR) (b) durante el ciclo de cultivo de quinua bajo condiciones de invernadero

La figura 7 nos muestra que los tratamientos modificaron la duración de la fenología de las plantas. El ciclo del cultivo de las plantas sin anegamiento tuvo una duración aproximada de 176 días, mientras que el anegamiento aplicado en las etapas vegetativas T1 (5 brotes laterales) su duración fue de 15 días menos que el control, el T2 (inicio de botón floral), se retrasó 10 días luego de que las plantas entraran al estrés por anegamiento, al igual que el T4 (mitad de antesis) que se retrasó con 6 días. Para el caso del T6 (fin de llenado de grano) su desarrollo fenológico duro 25 días menos que el control puesto que no tuvo una recuperación pos-anegamiento. En el caso de T3 (inicio de antesis) y T5 (inicio de llenado de grano) no lograron completar todas las fases fenológicas del cultivo debido a su senescencia después del tratamiento de anegamiento.



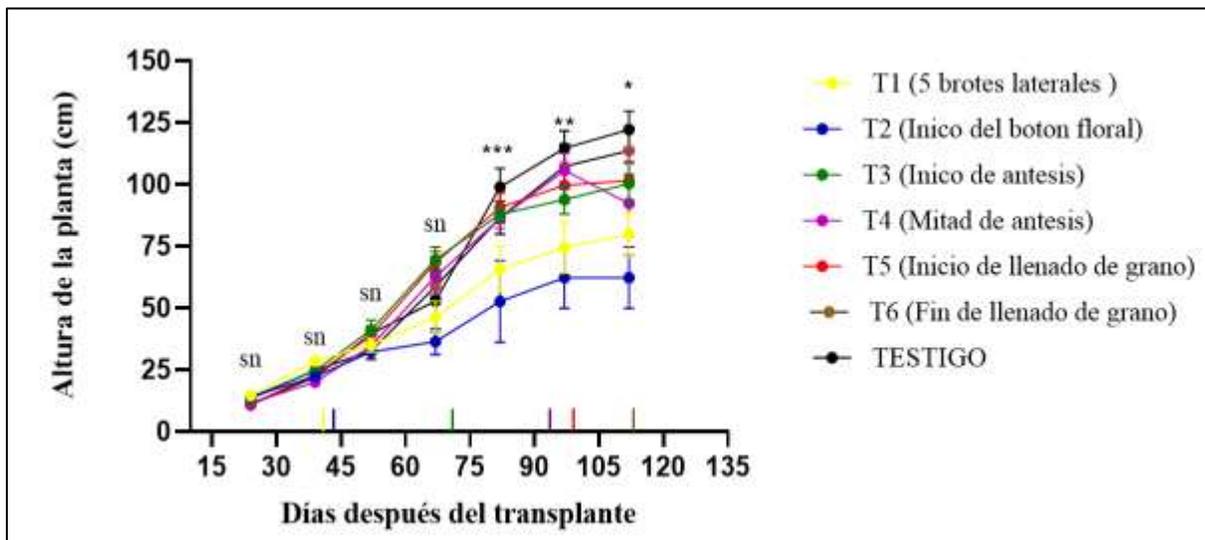
**Figura 7.** Duración de las etapas fenológicas de la quinua en cada tratamiento de aplicación de anegamiento. T1: 5 brotes laterales, T2: Inicio del botón floral, T3: Inicio de antesis, T4: Mitad de antesis, T5: Inicio de llenado del grano y T6: Final de llenado de grano

### 6.3. Altura de planta

El efecto del estrés por anegamiento fue evidente a los 82 días después del tercer tratamiento, donde se demuestra que el menor valor de altura de planta se presenta en el tratamiento con anegamiento en inicio de botón floral con 36.3 cm, seguido del primer tratamiento de 5 brotes laterales con 46,1 cm, diferenciándose del resto de tratamientos no estresados, se puede observar que la tendencia de menor crecimiento se mantiene en las plantas estresadas en la etapa de 5 brotes

laterales e inicio de botón floral (figura 8). Conforme las plantas avanzaron en su crecimiento, se observó un incremento en la altura, sin embargo, las plantas estresadas del primer y segundo tratamiento no lograron compensar las pérdidas de altura, obteniendo así un menor crecimiento en comparación a los demás tratamientos incluido el control.

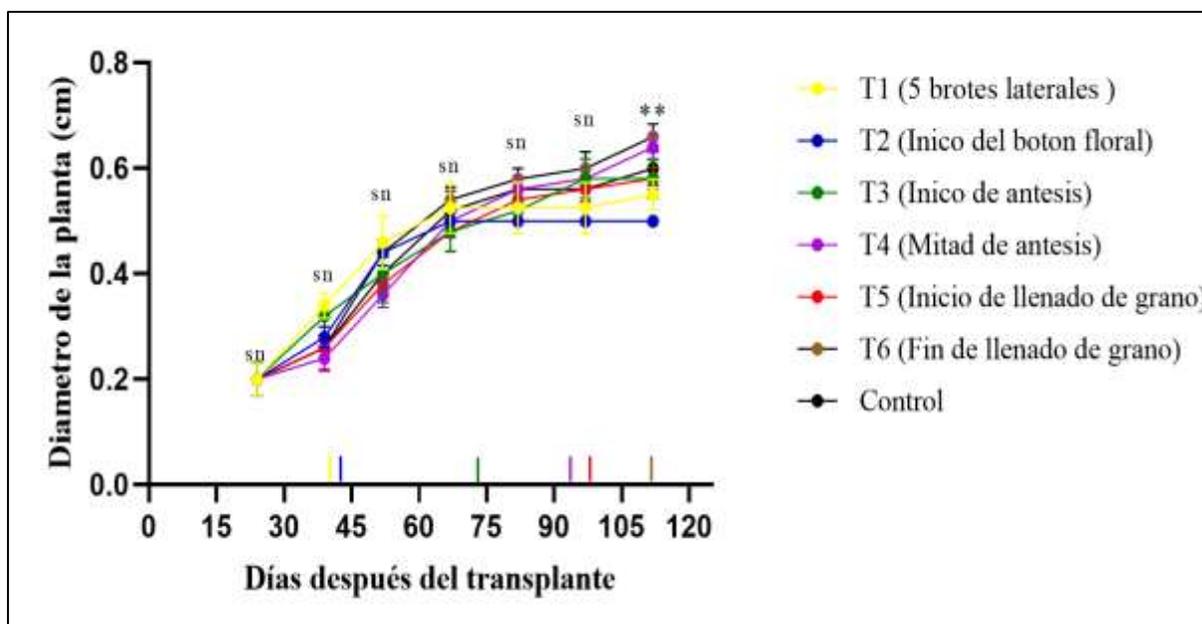
Así mismo, a los 112 días después del trasplante cuando la altura cesó su crecimiento en todos los tratamientos estresados por anegamiento y el control, se pudo observar que los tratamientos anegados en la etapas de cinco brotes laterales e inicio de botón floral disminuyeron su crecimiento en un -34,7 % -49,06 % respectivamente con relación al control, en la última evaluación se observó que el segundo tratamiento inicio del botón floral fue el que obtuvo menor valor, siendo significativamente diferente ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) de todos los demás.



**Figura 8.** Altura de planta en diferentes días después de la siembra en función del periodo sometido a anegamiento, las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje x hacen referencia al inicio de anegamiento en cada etapa fenológica, (ns) efecto no significativo y (\*\*\*) efecto significativo.

#### 6.4. Diámetro de tallo

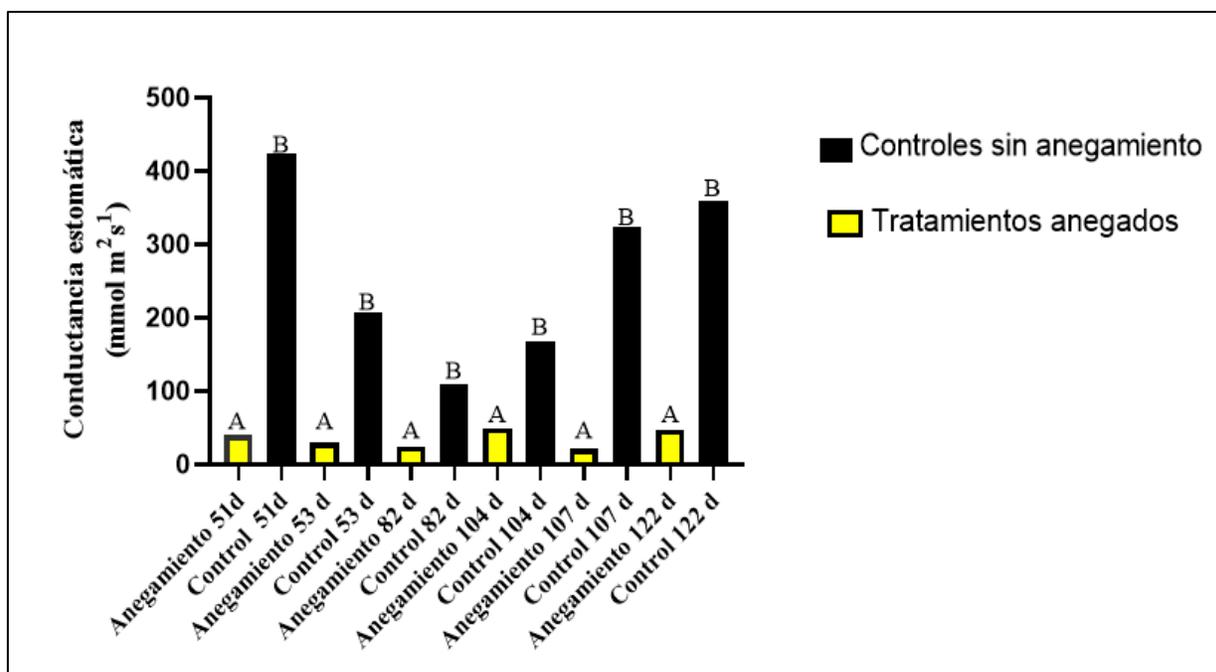
Los efectos del anegamiento fueron visibles a los 122 DDT, siendo menor el del tratamiento dos T2 (inicio de botón floral) con 0,5 cm, y siendo mayor el tratamiento seis T6 (fin de llenado de grano) con 0,66 cm, el testigo se encontraba en un valor medio al igual que los tratamientos uno, tres y cinco como se puede visualizar en la figura 9.



**Figura 9.** Diámetro del tallo de las plantas evaluadas cada 15 días, en función del periodo de anegamiento, según las escalas de BBCH del cultivo de quinua, las líneas verticales de colores ubicadas sobre el eje "x" hacen referencias al inicio del periodo de anegamiento en las diferentes etapas fenológicas, (ns) efecto no significativo y (\*\*) efecto significativo  $p < 0,01$ .

### 6.5. Conductancia estomática de las hojas

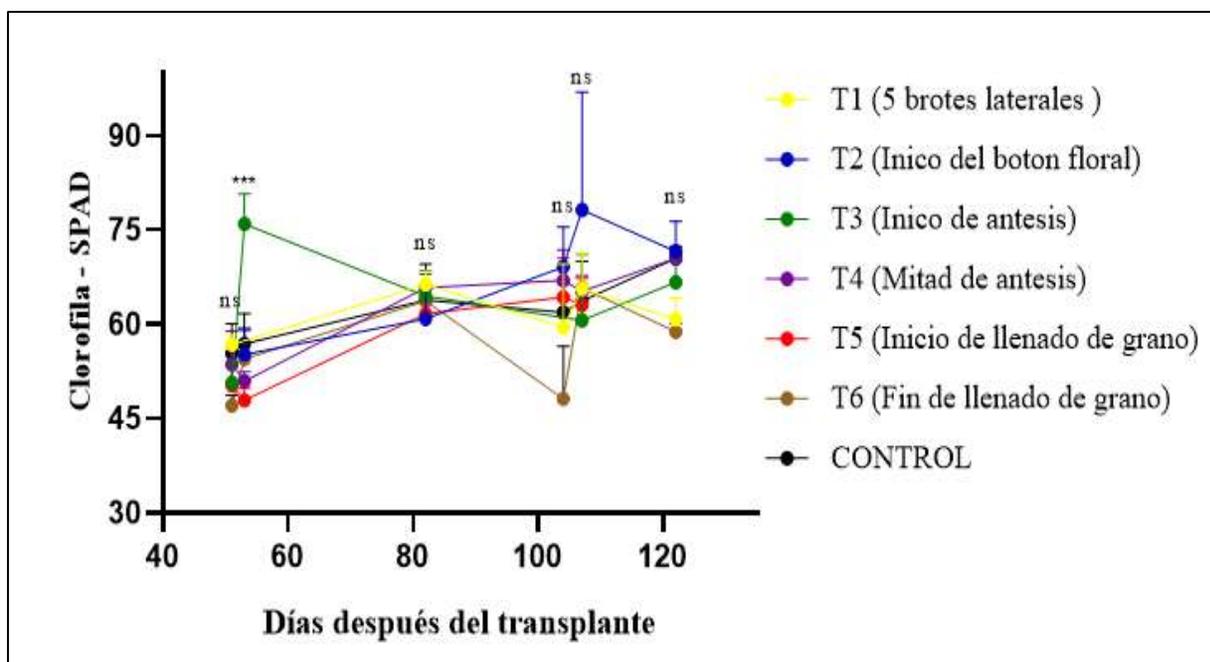
En la Figura 10 se puede observar el efecto del anegamiento sobre la conductancia estomática pues existe una disminución drástica en todos los tratamientos independientemente del estado fenológico en el que se aplicó el anegamiento, sugiriendo una disminución en la tasa transpiratoria de las hojas. Además, se observa una variación de la conductancia estomática durante el desarrollo de las plantas, que puede estar asociado al estado fenológico de las plantas y a la condición ambiental en la que se tomaron los datos con respecto al control; ya que las condiciones de temperatura y humedad varía a lo largo del ciclo del cultivo (Figura 6). El dato más bajo se observó en la etapa fenológica inicio de llenado de grano, las mismas que no lograron recuperarse del estrés por anegamiento.



**Figura 10.** Efecto del anegamiento en diferentes momentos del desarrollo vegetal sobre la conductancia estomática de las hojas. Las mediciones se tomaron al termino de los 10 días de estrés, las letras "A" y "B" indican la diferencia significativa  $p < 0,001$ .

### 6.6. Contenido relativo de clorofila (unidades de SPAD)

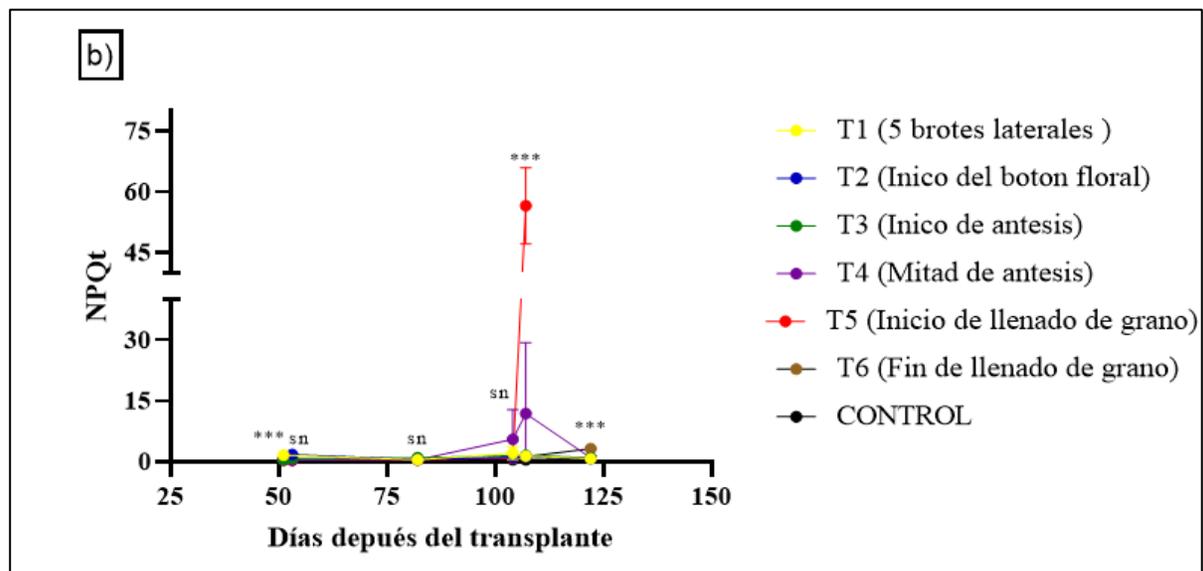
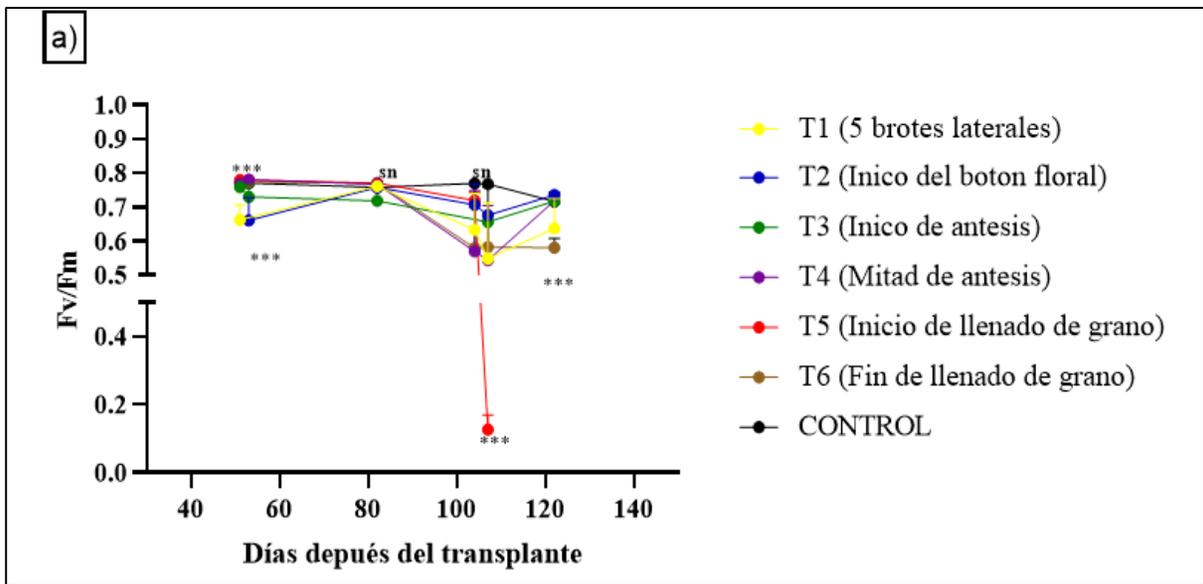
En la figura 11 se puede apreciar el efecto del anegamiento sobre el SPAD a lo largo de la fenología, a los 53 DDT al finalizar el segundo tratamiento se observa un cambio significativo, el tratamiento T3 (inicio de antesis) con 75,95 muestra un valor superior a los demás tratamientos incluyendo el control, el tratamiento T2 (inicio del botón floral) luego del anegamiento logra recuperarse obteniendo el mayor valor a los 122 DDT con 71,55 similar al control 70,44 y el menor valor lo obtuvo el tratamiento T6 (fin de llenado de grano) con 58,76, el mismo que no logro su recuperación del estrés al igual que el tratamiento T5 (inicio de llenado de grano).

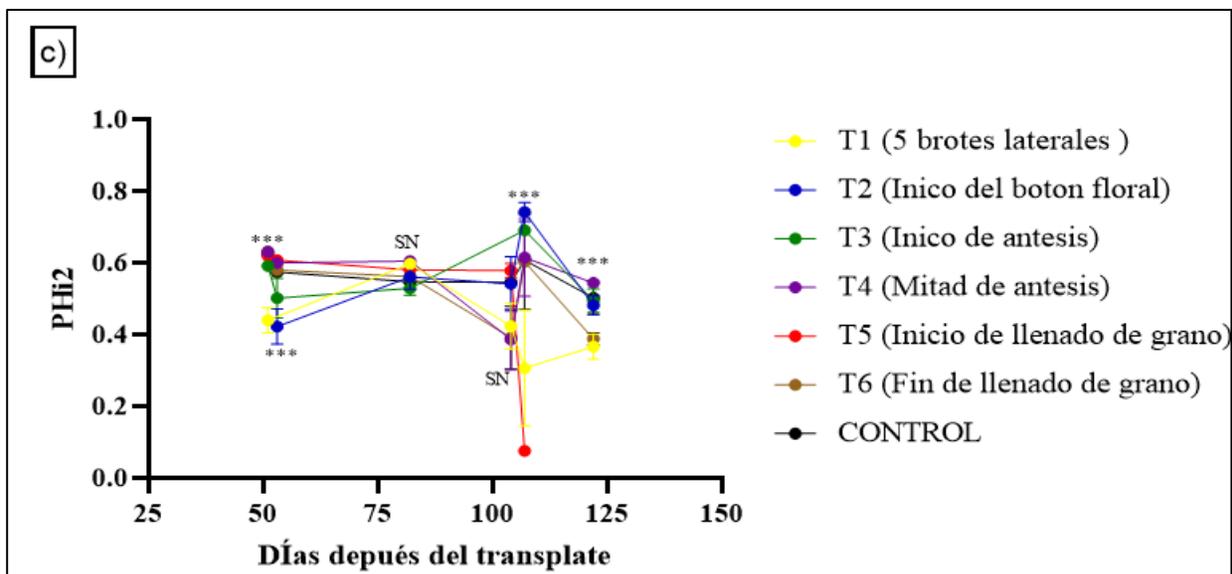


**Figura 11.** Efecto del anegamiento sobre el contenido relativo de la clorofila (SPAD) de la quinua en diferentes etapas fenológicas, el símbolo “\*\*\*” indica diferencia significativa  $p < 0,001$ . Las barras verticales en cada símbolo muestran errores estándar.

### 6.7. Fluorescencia de la clorofila

En cuanto a la fluorescencia de clorofila en la Figura 12 se observa los valores encontrados para la variable  $F_v/F_m$ . Este parámetro indica la eficiencia en la luz absorbida por el complejo antena del PSII y que es convertida en energía química, la misma que se vio significativamente afectada al final del anegamiento en comparación a las plantas de control, en los tratamientos T1 y T2 dieron valores bajos de 0,66 con respecto al control que obtuvo 0,77, al igual que pasa con  $\Phi_i2$  obteniendo valores bajos de con respecto al control y los mismo tratamientos obtuvieron valores altos en NPQ T1 con 1.60 y T2 con un valor de 1.74 con respecto al control 0,45, luego de terminar la etapa de anegamiento tuvieron un aumento progresivo en la variables  $F_v/F_m$  y  $\Phi_i2$  y una disminución en la variable NPQ, obteniendo a los 122 DDT valores similares al control con excepción en el tratamiento T6 (fin de llenado de grano) el cual presentó datos menores para las variables  $F_v/F_m$  y  $\Phi_i2$  y mayores para la variable NPQ con respecto al control, el mismo tratamiento no logro recuperarse del estrés por anegamiento.





**Figura 12.** Efecto del anegamiento sobre los parámetros fluorescencia de la clorofila en quinua: máxima eficiencia fotoquímica del PSII (Fv/Fm) (a), quenching no fotoquímico (NPQ) (b) y (c), Rendimiento cuántico del fotosistema II (Phi2). Los símbolos “\*\*\*\*” indican diferencia significativa en  $p < 0,001$ , las barras verticales en cada símbolo muestran los errores estándar.

### 6.8. Rendimiento y sus componentes

La tabla 4 muestra el efecto del anegamiento en diferentes etapas fenológicas sobre el rendimiento y sus componentes recolectados en madurez fisiológica. El rendimiento de la quinua en todos los tratamientos de anegamiento mostró valores significativamente menores a ( $p \leq 0,001$ ) que las plantas del control. La reducción de más visible del rendimiento debido al anegamiento vario de acuerdo a la etapa de desarrollo en la que se aplicó el tratamiento; sin embargo, a nivel de planta el impacto del anegamiento fue mayor en la etapa T3 (inicio de antesis), T5 (inicio de llenado de grano) y T2 (inicio de botón floral) con valores de  $0,00 \text{ Planta}^{-1}$ , para los dos primeros casos y con  $2,12 \text{ g/planta}$  para T2, mientras que las plantas que no fueron anegadas tuvieron un valor de  $14,53 \text{ g/Planta}^{-1}$ , estos valores debido a la senescencia de las plantas de dichos tratamientos, para el caso de T3 y T5 el 100 % de las plantas murieron y para el caso de T2 el 60 % de las plantas murieron y en T1 el 20 %. Por otro lado, el anegamiento redujo en menor medida los tratamientos aplicados en T6 (fin de llenado de grano), T1 (5 brotes laterales) y T4 (Inicio del llenado de grano) con valores de 5,76, 6,24 y 6,38 respectivamente.

El anegamiento redujo la biomasa aérea de manera significativa en todos los tratamientos ( $p \leq 0,001$ ), sin embargo, la mayor reducción de biomasa aérea se produjo cuando el anegamiento se aplicó en T2 (Inicio de botón floral) alcanzó un valor de  $5,06 \text{ g/Planta}^{-1}$  debido a la senescencia de

las plantas, lo que redujo la biomasa aérea con respecto al control, que tuvo un valor de 26.08 g/Planta<sup>-1</sup>. Por otro lado, la disminución de biomasa por efecto del anegamiento también fue evidente en los tratamientos T5 (inicio de llenado de grano), T1 (5 brotes laterales) y T3 (inicio de antesis) con valores de 8.44, 9.48 y 9, 86 g/Planta<sup>-1</sup> respectivamente.

Con respecto al índice de cosecha este se vio afectado por en anegamiento de manera significativa ( $p < 0,001$ ). El menor índice de cosecha perteneció a las plantas de quinua anegadas en T3(Inicio de antes) y T5 (inicio de llenado de grano) con valores de 0,00 por la senescencia de las plantas, de igual manera el tratamiento T2 (inicio del botón floral) con un valor menor de 0,22 con respecto al control (0,58).

Además, en la tabla 4 se muestran diferentes componentes de rendimiento como numero de granos y peso de 1000 granos. El número de granos por planta fue significativo, obteniendo un mayor número de granos por planta en los tratamientos sin anegamiento (5606,42 granos planta<sup>-1</sup>), mientras que el menor numero de granos fuel el del tratamiento T1 (2311,27) y con valores de o para el caso de T3 y T5.

En el caso del peso de grano que forma parte de los componentes principales del rendimiento, los resultados nos muestras que el peso de 1000 granos fue afectado por el anegamiento en todos los tratamientos. Obteniendo así un mayor valor en los tratamientos que no estuvieron expuestos al estrés (2,56), mientras que la mayor reducción se observó en el tratamiento T3 y T5 con un valor de 0 para ambos casos por la senescencia de las plantas, en el caso de T2 es el más bajo con respecto al control debido al número de plantas que sobrevivieron al estrés.

**Tabla 4** Rendimiento y repuesta de los componentes del rendimiento de la quinua al anegamiento en diferentes etapas de creciente

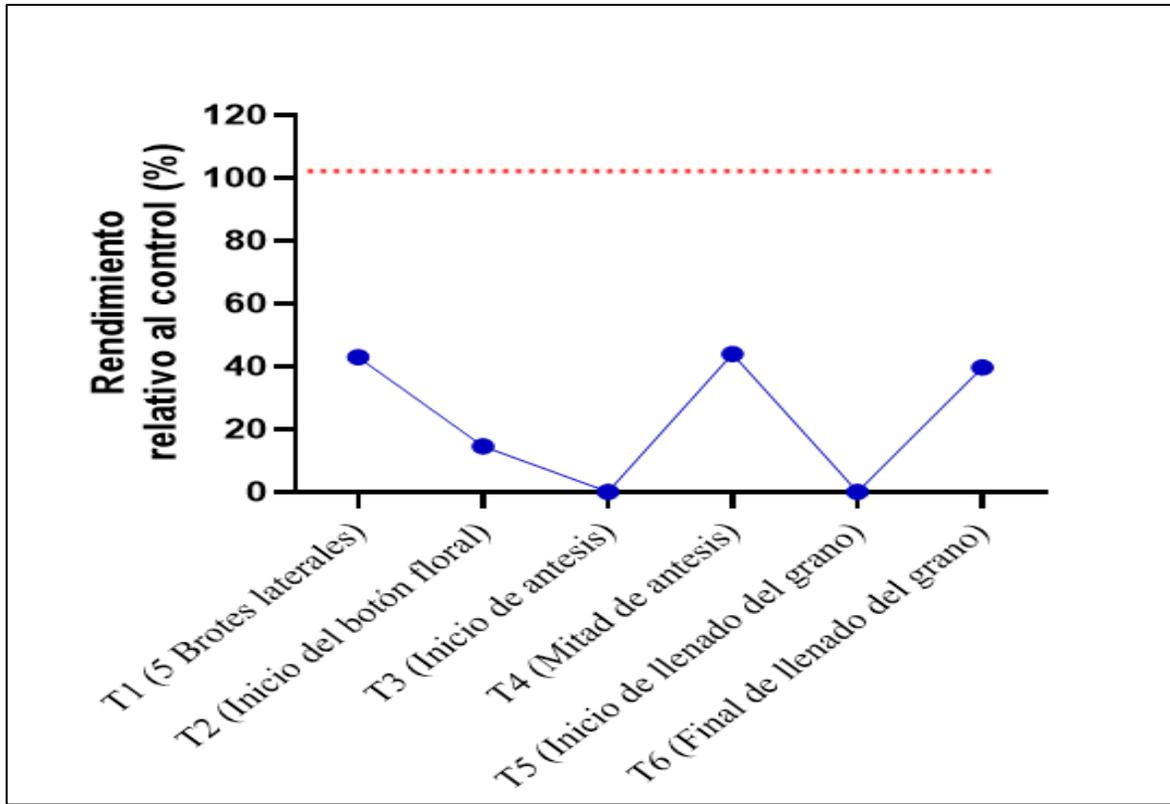
TRATAMIENTOS	Biomasa g Planta <sup>-1</sup>	peso de 1000 granos (g)	N° de granos g planta <sup>-1</sup>	Rendimiento g planta <sup>-1</sup>	Índice de cosecha
<b>T1 (5 Brotes laterales)</b>	9,48 a	2,15 b	2311,27 b	6,24 b	0,53 b
<b>T2 (Inicio del botón floral)</b>	5,06 a	1,19 ab	708,83 ab	2,12 ab	0,22 ab
<b>T3 (Inicio de antesis)</b>	9,86 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a
<b>T4 (Mitad de antesis)</b>	14,38 a	2,01 b	2603,71 b	6,38 b	0,35 ab
<b>T5 (Inicio de llenado del grano)</b>	8,44 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a
<b>T6 (Final de llenado del grano)</b>	14,66 a	2,30 b	2510,93 b	5,76 ab	0,39 b
<b>Control</b>	26,08 b	2, 56 b	5606,42 c	14, 53 b	0,58 b

<b>CV</b>	39,12	59,13	52,63	58,00	53,50
<b>Anegamiento (P &lt; 0,05)</b>	***	***	***	***	***

Las letras iguales en sentido vertical no expresan diferencia estadística significativa mediante tukey ( $p < 0,05$ ); los valores son las medias de 5 repeticiones (\*\*\*) efecto significativo  $p < 0.001$

### **6.9. Disminución del rendimiento causado por el anegamiento**

El rendimiento a nivel de planta se redujo significativamente en todos los tratamientos de anegamiento, como se puede observar en la figura 13, el efecto fue diferente dependiendo del momento en el que se aplicó el anegamiento, a nivel de tratamiento las mayores reducciones se presentan alrededor de la etapa reproductiva (floración y crecimiento inicial del grano) con una disminución de hasta el -100 %, debido a la muerte de las plantas. El anegamiento aplicado en T2 (Inicio del botón floral) disminuye el rendimiento en un 85 % con respecto al control, siendo el valor más bajo en comparación con los tratamientos que sobrevivieron al anegamiento, seguido del tratamiento T6 (fin de llenado de grano) que presenta un valor de 60 %. Para el caso de T1 (5 brotes laterales) y T4 (Mitad de antesis) el valor fue de 57 y 56 % respectivamente en comparación al control. A partir de los resultados se puede observar que el rendimiento es sensible durante todo el ciclo del cultivo, siendo crítico durante las etapas reproductivas.



**Figura 13.** Efecto del momento del anegamiento sobre el rendimiento en quinua, la línea color rojo horizontal indica el control, los puntos de color azul corresponden a los momentos donde se aplicó el anegamiento.

## 7. Discusión

El primer síntoma de daños por anegación es un cierre estomático, con el cierre de las estomas la absorción pasiva de agua por la planta disminuye, a esto se le agrega la absorción activa por falta de oxígeno en el córtex radicular. Así mismo, el movimiento del agua a distancia, vía xilema, mayoritariamente por flujo en masa, también decrece. Según (Gregory, 1985) menciona que la disminución de la transpiración implica un marchitamiento de las hojas y una senescencia precoz que termina en su caída.

Con relación a la duración de la fenología, el tratamiento T2 (botón floral) se observa un retraso de aproximadamente 7 días en antesis y a su vez el tiempo de madures con 10 días, en T4 (Mitad de antesis) el retaso fue en la maduración con 5 días y su tiempo de cosecha tardo aproximadamente 6 días más con respecto al control, estos resultados coinciden con De San Celedonio et al., (2014) quienes observaron que en trigo y en cebada en la etapa de antesis se retrasa con 7 y 13 días cuando se aplica un anegamiento de 15-20 días en etapas vegetativas. De igual forma estos datos son similares a los obtenidos por Amri et al., (2014) quienes determinaron un retraso de 7, 9 y 12 días en la etapa de floración al imponer al trigo a 28 días de anegamiento durante la etapa de macollaje. Por otro lado, cuando se aplicó el anegamiento en la etapa vegetativa T1 (5 brotes laterales), el periodo de antesis se adelantó 3 días con respecto al control, así mismo adelantó su periodo de frutos maduros con 6 días. Estos resultados coinciden con Ciancio et al., (2015) quienes mencionan que el anegamiento en fase vegetativa acorta el ciclo tanto en trigo con 3 días y cebada con 2. Así mismo Vantoi et al., (2010) en su estudio nos mencionan que las inundaciones durante dos semanas también aceleran la madurez promedio de las plantas de soja en 11 días, y que la senescencia temprana vario de 8 a 18 días en algunas variedades.

Según Moreno & Fischer, (2014) el anegamiento genera una disminución en la absorción de nutrientes como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) como consecuencia de cambios en el pH y relaciones iónicas en el suelo bajo condiciones de anegamiento, afectan el crecimiento y desarrollo de la planta lo que puede generar un retraso en las etapas. Así mismo Aldana et al., (2014) en su estudio nos menciona que las plantas uchuva (*Physalis peruviana* L.) inundadas entre 4 y 8 días mostraron un retraso en el crecimiento y desarrollo por lo que el inicio la floración se retrasó, esto debido a que en condiciones de inundación, se inhibe la formación de botones florales, antesis, formación y crecimiento de frutos en plantas no tolerantes al encharcamiento. Zhang et al., (2023)

nos menciona que, en el sorgo, el anegamiento disminuye el contenido de clorofila y redujo la fotosíntesis, acelerando el proceso de senescencia.

El anegamiento provocó una disminución en el crecimiento en las etapas T1 (de cinco brotes laterales) y T2 (inicio de botón floral) y por ende una reducción del crecimiento del tallo. Los síntomas del estrés por inundación abarcan la clorosis, retraso en el crecimiento, necrosis de tejidos y pueden llegar a ocasionar la muerte, lo que se puede evidenciar en algunas repeticiones y tratamientos de los T2 (inicio del botón floral) y T6 (fin de llenado de grano). Por lo que Peña-Castro, (2014) manifiesta que aun cuando el estrés finalice antes de ocasionar la muerte, el retraso en el crecimiento y el daño a los tejidos hacen que la planta que lo sufrió continúe con inconvenientes con respecto a las que no lo tuvieron que enfrentar. De igual manera (Peña-Castro et al., 2011) menciona lo que sucede con el arroz donde las plantas detienen su elongación y floración, esperan que la inundación desaparezca para reiniciar el crecimiento debido a que limitan el uso de reservas de carbohidratos (almidón, sacarosa y otros azúcares libres) como mecanismo para mantener las funciones vitales más esenciales. Así mismo, Romero et al. (2016) expone que el anegamiento en cultivo de trigo causa una crisis energética, con una disminución en el intercambio gaseoso y en la absorción de agua y nutrientes, que se traduce en una limitación del crecimiento. Así también, en plantas de papaya, Khondaker y Ozawa (2007) encontraron que tanto el crecimiento del diámetro del tallo como la altura de las plantas disminuyen por la inundación.

Continuando con la investigación Shao et al., (2013) manifiestan que el anegamiento prolongado puede reducir la asimilación neta de dióxido de carbono, la conductancia estomática y la absorción de nutrientes. Por ende, la conductancia estomática de los resultados muestran que las plantas sometidas a estrés por anegamiento en todas las etapas y al finalizar el mismo reducen significativamente con respecto al control, respuestas similares se obtuvieron en estudios de Yordanova et al., (2005) y Dell'Amico et al., (2002) donde en plantas de trigo el efecto del anegamiento reduce la tasa de asimilación neta de CO<sub>2</sub> (P<sub>n</sub>), transpiración (E), conductancia estomática (g<sub>s</sub>), junto al rendimiento cuántico del fotosistema II (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>), en cebada y tomate la inundación indujo el cierre estomático disminuyendo su conductancia estomática. Según (Moreno & Fischer, 2014) las plantas pueden evitar la pérdida de agua con la reducción de la conductancia estomática aunque el crecimiento se retrasa porque la asimilación de carbono también se reduce cuando hay estrés por anegamiento.

Así también, se observó una disminución del SPAD en las plantas sometidas al anegamiento independientemente de la fase fenológica, al finalizar la etapa de estrés todos los tratamientos presentaban las hojas marchitas y en algunos casos se observó la senescencia de las hojas basales, González et al., (2009) realizaron experimentos sobre anegamiento en quinua y obtuvieron una disminución en el contenido de clorofila, un estudio realizado por Nel Garcia et al., (2014) en plantas de uchuva (*Physalis peruviana* L.) se observó que las plantas anegadas por 8 días presentaron coloración amarillenta, abscisión de las hojas y una disminución de la tasa fotosintética. Así mismo, Baracaldo et al., (2014) aporta que las plantas bajo estrés por anegamiento tienden a perder hojas más rápidamente, lo que reduce la cantidad de clorofila disponible para la fotosíntesis, contribuyendo así la disminución en los valores de SPAD.

Además, (Moreno & Fischer, 2014) mencionan que la menor actividad de enzimas fotosintéticas, el disparejo transporte de foto asimilados, el bajo potencial hídrico y la conductancia estomática y el menor contenido de clorofilas, son los factores que contribuyen a la disminución de la actividad fotosintética en condiciones de anegamiento, también Shao et al., (2013) aporta que el daño al aparato fotosintético durante el anegamiento nos da como resultado una relación  $F_v/F_m$  más baja, especialmente en las dos primeras etapas. En nuestro estudio esta relación se evidencia en las dos primeras etapas T1 (5 brotes laterales) y T2 (inicio del botón floral) y una reducción más notoria en el tratamiento T6 (fin de llenado de grano), datos similares se observan en un estudio realizado por Ploschuk et al., (2018) en cebada, la fotosíntesis redujo los valores que solo representaban el 25 % del control, después de una semana de anegamiento se evidenciaron daños al PSII (caída en  $F_v/F_m$ ).

El estrés por anegamiento redujo la biomasa aérea de las plantas de quinua en todas las etapas fenológicas, estos resultados coinciden con González et al., (2009) quienes en sus estudio en quinua encontrado las plantas sometidas a estrés por anegamiento muestran una reducción de la producción de biomasa, esto en comparación. con las plantas bien drenadas. Zhang et al., (2023) nos menciona que la pérdida de la biomasa aérea fue resultado de una reducción de tasa fotosintética neta, conductancia estomática y tasa de transpiración, lo que redujo la asimilación de carbono. Por otro lado Kozlowski, (1997) indica que la producción de biomasa de la planta es afectada por la disminución de la absorción de nutrientes por las condiciones de hipoxia radical.

Varios estudios confirman que el estrés por anegamiento en diferentes etapas fenológicas puede reducir el rendimiento del cultivo, esto va a depender del tiempo de anegamiento y las etapas

de crecimiento, en nuestra investigación el anegamiento a nivel de tratamiento redujo el rendimiento de quinua en todas las etapas fenológicas, sin embargo la mayor pérdida de grano (g/planta) se produjo en la etapa temprana en el tratamiento T2 (inicio de botón floral), cabe recalcar que solo existían 2 unidades experimentales, seguida por los tratamiento T6 (fin de llenado de grano) la cual que no tuvo una recuperación pos-anegamiento, la reducción de T4 (mitad de antesis), puede confirmar que las plantas tienen menor capacidad de recuperación cuando el anegamiento produce más tarde en el ciclo de cultivo tal como lo menciona De San Celedonio et al., (2014), caso contrario sucede con T1 (5 brotes laterales), pues estos autores establecieron que en etapas tempranas del ciclo no se evidencia diferencia significativas en el rendimiento en grano en comparación al control bien drenado cuando las plantas son sometidas a un anegamiento de 15 días esto debido a que las plantas pueden recuperarse mediante diversos mecanismos. Sin embargo Shao et al., (2013) menciona que el anegamiento en 3 días disminuye significativamente el rendimiento en grano de trigo cuando el evento ocurre en cualquier etapa de crecimiento del cultivo.

Estos resultados concuerdan con las investigaciones de De San Celedonio et al., (2014) que mencionan que el periodo cercano a la antesis fue el más susceptible al encharcamiento, reduciendo el rendimiento para ambos casos. De igual manera Robertson et al., (2009) indica que en plantas de trigo anegadas durante 14 a 22 días después de la siembra reduce el número de granos por espiga en el tallo principal y los macollo, y en consecuencia el rendimiento de grano. Así mismo Olgun et al., (2008) señala que 15 días de encharcamiento durante la floración reduce en un 62 % la producción de semillas, deduciendo así que las primeras etapas de crecimiento y las fases productivas son sensibles al estrés por anegamiento. De acuerdo a Tian et al., (2019) el encharcamiento reduce la actividad fotosintética, la acumulación de materia seca y el crecimiento general de las plantas, lo que conduce a menores rendimientos. Así mismo (Zhang et al. (2023) señalan que las condiciones de anegamiento inhiben la actividad fotosintética y reduce el contenido de clorofila lo que da como resultado una menor tasa de fotosíntesis neta, provocando una disminución en el rendimiento

Por otra parte, la formación de aerénquima y raíces adventicias es una característica morfológica de las especies tolerantes al anegamiento. De igual forma, Fukao et al. (2019) mencionan que el aerénquima mejora la difusión interna de oxígeno desde las partes aéreas hasta las raíces anegadas, lo que permite que las raíces mantengan la respiración aeróbica. Cabe recalcar

que las repeticiones que resistieron al estrés por anegamiento presentaron la formación de raíces adventicias como mecanismo de tolerancia similares a los resultados presentados por Manik et al. (2022) en plantas de cebada, esto para tratar de contrarrestar la falta de oxígeno.

En las tablas de las propiedades físicas del suelo realizadas por Israelsen y Hansen en 1979, describen que, para suelos con textura franco, la CC debería oscilar entre los 18-26 % y el PMP entre 6.-10 %; mientras que para suelos franco-arcillos, la CC debería oscilar entre los 23-31 %, mientras que el PMP entre el 12-15 %. Haciendo la comparación, los resultados obtenidos utilizando las placas Richard nos permiten entrar dentro de rangos aceptables, debido a la textura y propiedades físicas favorables los suelos francos se consideran aptos para una amplia variedad de cultivos. Así mismo la capacidad de aireación del 13,08 % obtenida en la presente investigación se encuentra en el rango del 10 % y 20 % que según Guevara y Fernandez (2023), es considerada una condición óptima para muchas plantas, incluida la quinua, ya que permite un balance adecuado entre agua y aire en el suelo.

## 8. Conclusión

- El estrés por anegamiento afectó el crecimiento y desempeño fisiológico de la planta de quinua, y su impacto depende del momento de anegamiento. Este estudio mostró que el anegamiento aplicado en los estados de inicio del botón floral y antes retrasaron el ciclo fenológico, por el contrario, cuando el anegamiento se aplicó tempranamente en la etapa de brotes laterales el periodo de madurez se adelantó. La etapa más afectada fue en inicio de floración y crecimiento de grano, misma que no logró sobrevivir al periodo de anegamiento, y presenta una reducción en el SPAD, la fluorescencia de la clorofila, disminuyendo la relación  $F_v/F_m$  (máxima eficiencia cuántica del fotosistema II) y  $\Phi_2$  y aumento en el quenching no fotoquímico (NPQ), advirtiendo un deterioro en la fotosíntesis producto del estrés.
- Se pudo verificar que el estrés por anegamiento provoca reducción en el crecimiento de las plantas de quinua, un descenso de las hojas y cambios en el rendimiento fisiológico, la clorofila y la conductancia estomática, independientemente de la fase en la que se empleó el estrés. El estudio demostró que el anegamiento en los estados vegetativos T1 (5 brotes laterales) y T2 (inicio del botón floral) disminuye el crecimiento y las posibilidades de tener una recuperación pos-anegamiento, sin embargo, luego del post-anegamiento.
- La reducción del rendimiento de grano bajo anegamiento se asoció con la reducción de la biomasa y con menor número de granos. El anegamiento en T2 (inicio del botón floral) y T5 (inicio de llenado de grano) redujo la biomasa aérea ( $\text{g planta}^{-1}$ ) en menor proporción, además en T2 redujo el peso de 1000 granos (g), número de granos ( $\text{g planta}^{-1}$ ) e índice de cosecha.
- Debido a la pérdida significativa del rendimiento, que puede llegar al 100% se concluye que la quinua variedad excelencia es altamente sensible al anegamiento.

## **9. Recomendaciones**

- Realizar investigaciones sobre el efecto de diferentes duraciones de anegamiento en diferentes etapas de crecimiento sobre las variables fisiológicas y rendimiento en el cultivo de quinua.
- Evaluar el efecto del anegamiento sobre la expresión de genes de fitohormonas, así como la concentración hormonal como ácido abscísico (ABA), etileno y giberelinas en función de la disponibilidad de agua en las plantas.
- Explorar y cuantificar el mecanismo de respuesta de las plantas variedad excelencia al anegamiento.

## 10. Bibliografía

- Aldana, F., Pedro Nell, G., & Fischer, G. (2014, diciembre 30). Efecto del estrés por anegamiento sobre el crecimiento, desarrollo y sintomatología de plantas de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *38(149)*, 393-400. Obtenido de <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/114>
- Alduce, P., & González, M. (2009). Desastres asociados al clima en la agricultura y medio rural en Chile - Universidad de Chile. Chile. Obtenido de <https://uchile.cl/publicaciones/62639/desastres-asociados-al-clima-en-la-agricultura-y-medio-rural-en-chile>
- Apolo-Apolo, O., Pérez-Ruiz, M., & Egea, G. (2020). A Mixed Data-Based Deep Neural Network to Estimate Leaf Area Index in Wheat Breeding Trials. *10(2)*, 175. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/2/175>
- Arduini, I., Orlandi, C., Pampana, S., & Masoni, A. (2016, 07 28). Waterlogging at tillering affects spike and spikelet formation in wheat. *Waterlogging at tillering affects spike and spikelet formation in wheat*, *67(7)*, 703-711. Obtenido de <https://www.publish.csiro.au/cp/cp15417>
- Ashraf, M. A. (2012, Abril 05). Waterlogging stress in plants: A review. *AFRICAN JOURNAL OF AGRICULTURAL RESEARCH*, *7*. <https://doi.org/10.5897/AJARX11.084>
- Cun González, R., Herrera Puebla, J., Duarte Díaz, C., Sarmiento García, O., González Echevarría, D., & González Morales, D. (2018, octubre 21). Influencia del tiempo de inundación en el girasol para la proyección de sistemas de drenaje. *Influencia del tiempo de inundación en el girasol para la proyección de sistemas de drenaje*, *8(4)*, 21. Obtenido de <https://ojs.edicionescervantes.com/index.php/IAgric/article/view/1029>
- Dell'Amico, J. M., Torrecillas, A., Rodríguez, P., Morales, D., Sánchez-Blanco, & María de J. (2002). RESPUESTA DEL TOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.) A 36 HORAS DE INUNDACIÓN EN. *Cultivos Tropicales*, *23(3)*, 77-83. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193218120011.pdf>
- Ding, J., Liang, P., Wu, P., Zhu, M., Li, C., Zhu, X., & Guo, W. (2020). Identifying the Critical Stage Near Anthesis for Waterlogging on Wheat Yield and Its Components in the Yangtze River Basin, China. *10(1)*, 130. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/1/130>

- FAO. (2011, julio). La Quinoa: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. *La Quinoa: Cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/aq287s/aq287s.pdf>
- Fernández-Calleja, M., Monteagudo, A., Casas, A., Boutin, C., Pin, P., Morales, F., & Igartua, E. (2024, Enero 25). Rapid On-Site Phenotyping via Field Fluorimeter Detects Differences in Photosynthetic Performance in a Hybrid—Parent Barley Germplasm Set. *Rapid On-Site Phenotyping via Field Fluorimeter Detects Differences in Photosynthetic Performance in a Hybrid—Parent Barley Germplasm Set*, 20(5), 1486. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/5/1486>
- Fischer, G. (2021). El aumento de las inundaciones generado por el cambio climático afectará nuestros cultivos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(3), 9619-9620. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/1799/179969339001/html/>
- García, N., da-Silva, C. J., Cocco, K. L., Pomagualli, D., & de Oliveira, F. K. (2020, marzo 1). Waterlogging tolerance of five soybean genotypes through different physiological and biochemical mechanisms. *172*, 103975. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098847220300010?via%3Dihub>
- González, J. A., Gallardo, M., Hilal, M., M. R., & Pardo, F. (2009, Enero). Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought and waterlogging stresses: Dry matter partitioning. *Physiological responses of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) to drought and waterlogging stresses: Dry matter partitioning*, 50. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/279582174\\_Physiological\\_responses\\_of\\_quinoa\\_Chenopodium\\_quinoa\\_Willd\\_to\\_drought\\_and\\_waterlogging\\_stresses\\_Dry\\_matter\\_partitioning/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/279582174_Physiological_responses_of_quinoa_Chenopodium_quinoa_Willd_to_drought_and_waterlogging_stresses_Dry_matter_partitioning/citation/download)
- González, J., Gallaro, M., Rosa, M., Hilal, M., & Pardo, F. (2009). Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to drought and waterlogging stresses: dry matter partitioning. *50*. Obtenido de [https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/77973/CONICET\\_Digital\\_Nro.f682c7cd-10c6-4560-b8e0-0a5fb4b143e9\\_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/77973/CONICET_Digital_Nro.f682c7cd-10c6-4560-b8e0-0a5fb4b143e9_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Guevara, D., & Fernández de Ullivarri, J. (2023). Aireación del suelo. *Guía de estudio Aireación del suelo*.

- Jiménez Suancha, S., Alvaro Sanabria, O., & Balaguera López, H. (2015, septiembre 12). Fluorescencia como indicador de estrés en *Helianthus annuus* L. Una revisión. *Fluorescencia como indicador de estrés en Helianthus annuus L. Una revisión*, 9(1), 149-160. <https://doi.org/10.17584/rcch.2015v9i1.3753>
- Jose, M. I. (2014, septiembre 1). RESPUESTAS DEL CULTIVO DE SOJA AL ANEGAMIENTO. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/275649755\\_RESPUESTAS\\_DEL\\_CULTIVO\\_DE\\_SOJA\\_AL\\_ANEGAMIENTO](https://www.researchgate.net/publication/275649755_RESPUESTAS_DEL_CULTIVO_DE_SOJA_AL_ANEGAMIENTO)
- Kozlowski, T. (1984). *Flooding and Plant Growth*. *Aca-*
- Kozlowski, T. (1997). Responses of woody plants to flooding and salinity. *Responses of woody plants to flooding and salinity*, 17(7), 449. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.7.490>
- López López, R., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A., López Cruz, I., & Sánchez Cohen, I. (2009, Marzo). Agricultura técnica en México. *Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas\**, 35(1), 97-11. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0568-25172009000100010&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0568-25172009000100010&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- López-Tolentino, G., Lira-Saldivar, R. H., & Méndez-Argüello, B. (s.f.). Medición de Intercambio Gaseoso, Área Foliar e Índice de Clorofila en Plantas Elicitadas. *Medición de Intercambio Gaseoso, Área Foliar e Índice de Clorofila en Plantas Elicitadas*. Obtenido de <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/338/1/Medici%C3%B3n%20de%20Intercambio%20Gaseoso%2C%20%C3%81rea%20Foliar%20e%20%C3%8Dndice%20de%20Clorofila%20en%20Plantas%20Elicitadas%20con%20Nanopart%C3%ADculas.pdf>
- M. V., M., R. J., O., S. K., G., H., R., & H., J. (2004, septiembre 1). Performance of subsurface drains for reclaiming waterlogged saline lands under rolling topography in Tungabhadra irrigation project in India. *Performance of subsurface drains for reclaiming waterlogged saline lands under rolling topography in Tungabhadra irrigation project in India*, 69(1), 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.01.001>
- MAE. (2013). Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. .

- MAG, M. (2023, JULIO 27). MAG e INIAP presentan nuevas variedades de haba y quinua, para aumentar producción. *MAG e INIAP presentan nuevas variedades de haba y quinua, para aumentar producción*. Obtenido de <https://www.agricultura.gob.ec/mag-e-iniap-presentan-nuevas-variedades-de-haba-y-quinua-para-aumentar-produccion/#:~:text=La%20nueva%20variedad%20Quinua%20INIAP,con%20la%20variedad%20INIAP%2DTunkahuan>.
- Martis, P. (2017, febrero 6). *Spectrum Technologies, Inc.* Obtenido de Spectrum Technologies, Inc: [https://www.fondriest.com/pdf/spectrum\\_tdr\\_150\\_manual.pdf](https://www.fondriest.com/pdf/spectrum_tdr_150_manual.pdf)
- Moreno González , S., Perales Vela, H., & Salcedo Alvarez , M. (2008). LA FLUORESCENCIA DE LA CLOROFILA a COMO HERRAMIENTA EN LA INVESTIGACIÓN DE EFECTOS TÓXICOS EN EL APARATO FOTOSINTÉTICO DE PLANTAS Y ALGAS. *27(4)*, 119-129. Obtenido de <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=37206>
- Moreno, A. y. (2014). *Efectos del anegamiento en los frutales. una revisión*. Obtenido de Efectos del anegamiento en los frutales. una revisión: <https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/anegamiento.htm>
- Muñoz, P., & Hernandez, G. (2016, junio 2). Fluorescencia de clorofila a como indicador de los efectos de la ceniza volcánica en plántulas de frijol.
- Murquincho Carrión, L. (2023, noviembre 21). Identificación del periodo crítico bajo estrés por anegamiento sobre la fisiología y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) bajo condiciones controladas. Obtenido de <https://dspace.unl.edu.ec/handle/123456789/28431>
- Nel Garcia, P., Aldana, F., & Fischer, G. (2014, Diciembre 30). Effect of waterlogging stress on the growth, development and symptomatology of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plants. *38*. Obtenido de <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/114/87>
- Ospina , B. (2018). Estudio del quenching no fotoquímico de la fluorescencia de clorofila y parámetros fotosintéticos relacionados en plantas y algas. *Estudio del quenching no fotoquímico de la fluorescencia de clorofila y parámetros fotosintéticos relacionados en plantas y algas*. Obtenido de [https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis\\_n6902\\_OspinaCalvo](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/tesis/document/tesis_n6902_OspinaCalvo)

- Patrignani, A., & Ochsner, T. (2015). Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover*, 107(6), 2312-2320. Obtenido de <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj15.0150>
- Peña Castro, J. M. (2014, Diciembre ). Respuesta molecular de las plantas ante el estrés por inundación: lecciones aprendidas del gen SUB1A. *Respuesta molecular de las plantas ante el estrés por inundación: lecciones aprendidas del gen SUB1A*, 37(4), 325-337. Mexico: Revista fitotecnia mexicana. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0187-73802014000400006&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-73802014000400006&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Peralta, E. (2009, noviembre ). LA QUINUA EN ECUADOR. *LA QUINUA EN ECUADOR*. Quito. Obtenido de <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/805/1/iniapsclgaq1.pdf>
- Perdomo, A., González , R., M, G., Aonso, M., & E, Y. (2022). Determinación del tiempo de inundación del cultivo del maíz (*Zea mays L.*). *Determinación del tiempo de inundación del cultivo del maíz (Zea mays L.)*, 43(1). Obtenido de <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1647>
- Pinto Mena , M. B. (2013, Octubre 7). EL CULTIVO DE LA QUINUAY EL CLIMA EN EL ECUADOR. *EL CULTIVO DE LA QUINUAY EL CLIMA EN EL ECUADOR*.
- Ramos Pérez, I., & Marañón, T. (2009, mayo 1). Effects of waterlogging on seed germination of three Mediterranean oak species: Ecological implications. *Effects of waterlogging on seed germination of three Mediterranean oak species: Ecological implications*, 35(3), 442-428. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.01.007>
- Romero R. Silva P. Saguel, O. (2016). Anegamiento y su efecto sobre la fisiología, crecimiento y rendimiento de trigo en zonas mediterráneas manejadas en cero labranza. 44, 47-57. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2016.v44n1-05>
- Rubio Gutiérrez , A. (2010, julio). LA DENSIDAD APARENTE EN SUELOS FORESTALES DEL PARQUE NATURAL LOS. Obtenido de <https://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>

- SGR. (2020). Obtenido de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/06/6.-Informe-Ludico.pdf>
- Shao, G. C. (2013, Septiembre 1). Photosynthesis and growth of winter wheat in response to waterlogging at different growth stages. *51(3)*. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0039-9>
- Sosa Zúñiga, V., Brito-Salentim, V. H., F. Fuentes, F., & Steinfert, U. (2017). Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on the BBCH scale. *Phenological growth stages of quinoa (Chenopodium quinoa) based on the BBCH scale, 171(1)*, 117-124. <https://doi.org/10.1111/aab.12358>
- Teomiro, E. (2017). El 'boom' de la quinoa. Obtenido de <https://www.unav.edu/web/global-affairs/detalle1/-/blogs/el-boom-de-la-quinoa>
- Yordanova, R., Uzunova, A., & Popova, L. (2005). Effects of short-term soil flooding on stomata behaviour. *BIOLOGIA PLANTARUM*, *49*, 317-319. Obtenido de <https://bp.ueb.cas.cz/pdfs/bpl/2005/02/33.pdf>

## 11. Anexos

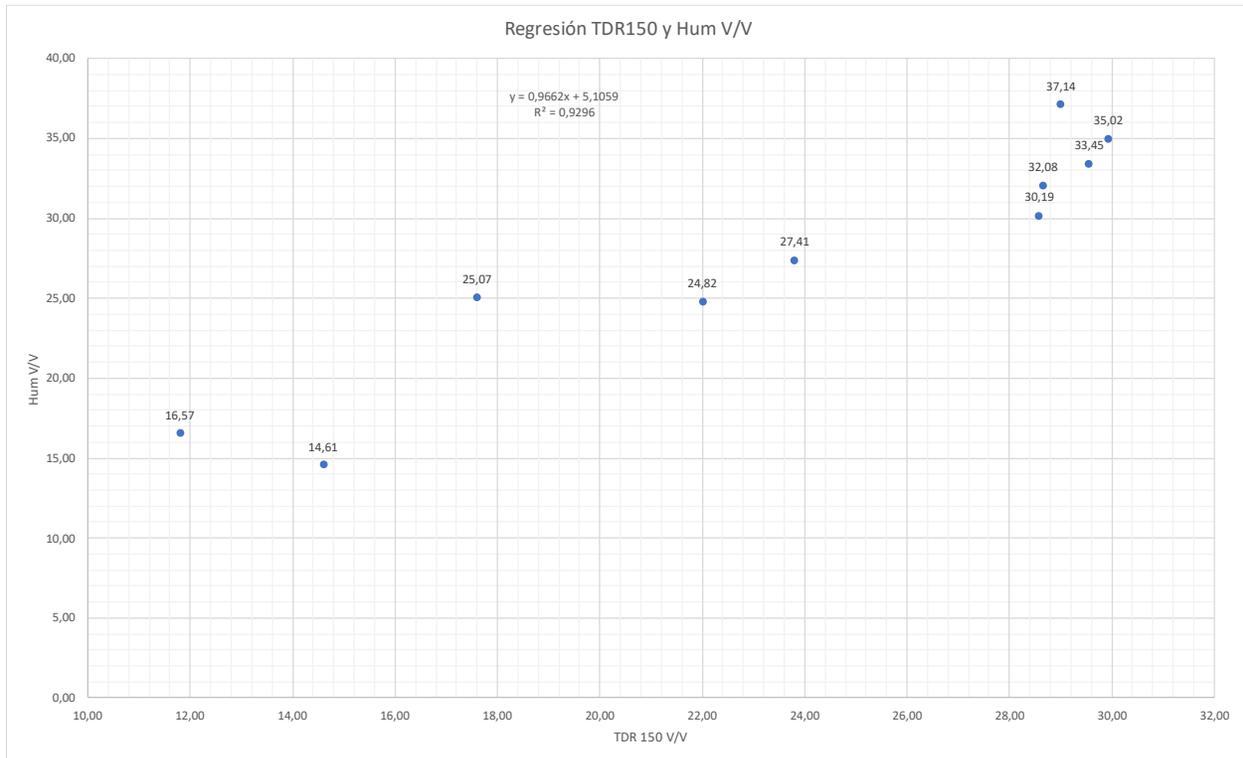
### Anexo 1. Descripción de los estados fenológicos de la quinua

<i>Código BBCH</i>	
<i>2-dígitos</i>	<i>Descripción</i>
<i>Fase fenológica principal 0: germinación</i>	
00	Semilla seca
01	Inicio imbibición de la semilla
03	Inicio imbibición de la semilla completa
05	Emergencia de la radícula de la semilla
07	Aparición del hipocótilo
08	Hipocótilo con cotiledones creciendo hacia la superficie del suelo
09	Emergencia de los cotiledones a través del suelo
<i>Etapas principales de crecimiento 1: desarrollo foliar</i>	
10	Cotiledones completamente expandidos
11	Primer par de hojas verdaderas visibles
12	Segundo par de hojas visibles
1	la codificación continua igual hasta la subetapa 19
19	Nueve o más pares de hojas verdaderas visibles
<i>Fase fenológica principal 2: formación de tallos laterales</i>	
20	Yemas laterales visibles u hojas laterales expandidas sin tallos laterales
21	Un brote lateral visible
22	Dos brotes laterales visibles
2	La codificación continua igual hasta la subetapa 29
29	Nueve brotes laterales visibles
<i>Fase fenológica principal 3: elongación del tallo (omitida)</i>	
<i>Fase fenológica principal 4: desarrollo de órganos vegetativos de consumo (omitida)</i>	
<i>Fase fenológica principal 5: emergencia de la inflorescencia</i>	
50	Inflorescencia presente pero aun envuelta por hojas
51	Hojas que rodean la inflorescencia separada, la inflorescencia es visible desde arriba

59	Inflorescencia visible, pero flores aún cerradas
<i>Fase fenológica principal 6: floración</i>	
60	comienzo de la floración: aparición de anteras
67	Comienzo de la antesis: principal inflorescencia de las flores con las primeras anteras senescentes
69	Antesis completa: flores principales inflorescentes con anteras senescentes
<i>Estado principal de desarrollo 7: desarrollo del fruto</i>	
70	cuajado: engrosamiento del ovario y primeros granos visibles en el tallo principal
<i>Estado de desarrollo principal 8: maduración</i>	
81	Grano lechoso, fácil de romper con las uñas, contenido líquido y pericarpio verde
85	Grano pastoso, fácil de romper con las uñas, contenido pastoso y blanco, pericarpio verde, beige, rojo o negro.
89	Grano Maduro, difícil de romper con las uñas, su contenido es seco, el pericarpio es verde, beige, rojo o negro. Listo para cosechar.
<i>Fase principal de crecimiento 9: senescencia</i>	
91	Sólo hojas basales senescentes
93	Hojas de la primera mitad de la planta, partiendo desde la base, senescentes
95	Todas las hojas están muertas, el tallo cambia su color desde Amarillo a marrón
97	Planta muerta y seca
99	Producto cosechado

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

## Anexo 2. Regresión lineal entre las lecturas del TDR y la humedad



## Anexo 3. Mezcla de tierra de la Argelia, arena y tierra negra en proporciones 8:1:1.



**Anexo 4. Llenado de fundas**



**Anexo 5. Toma de muestras de suelo en cilindros**



**Anexo 6.** Medición de ph del sustrato



**Anexo 7.** Fertilización química de las plantas por maceta



**Anexo 8.** Semilla certificada variedad Excelencia



**Anexo 9.** Plantas de quinua trasplantadas



**Anexo 10. Plantas anegadas**



**Anexo 11. Medición de la altura de las plantas de quinua**



**Anexo 12.** Medición del SPD de las plantas de quina



**Anexo 13.** Fumigación de control para plagas



**Anexo 14.** Plagas presentes en el cultivo a. pulgones y b. larva Noctuidae



**Anexo 15.** Presencia de raíces adventicias



**Anexo 16.** Plantas que no se recuperaron del estrés



**Anexo 17.** Eliminación manual de pulgones



**Anexo 18.** Medición de humedad con el TDR



Loja, 12 de diciembre de 2024

Sr. Jhoel Fernando Herrera Granda

**CERTIFICADO GRADE (B2) OTORGADO POR CAMBRIDGE ENGLISH LANGUAGE ASSESSMENT**

**CERTIFICO:**

Haber realizado la traducción de español al idioma inglés del resumen del Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del título de Ingeniera Agrónoma titulado "Efecto del anegamiento en diferentes etapas fenológicas sobre el crecimiento y rendimiento en quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) var. Excelencia.", de autoría de la señorita estudiante María Magdalena Gaona Jiménez, con cédula 1105726341.

Se autoriza al interesado hacer uso de la misma para los trámites que crea conveniente.

**JHOEL  
FERNANDO  
HERRERA  
GRANDA** Firmado digitalmente por JHOEL FERNANDO HERRERA GRANDA  
Fecha: 2024.12.12 21:23:22 -05'00'

.....  
Sr. Jhoel Fernando Herrera Granda  
C.I. 1150231890