# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

## FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

## CARRERA DE INGENIERÍA FORESTAL

### INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR, MODALIDAD PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**TEMA:**

"**Efectos de fertilización en el crecimiento inicial de** *Eucalyptus grandis* hill ex maiden, **Cachaco, provincia de Imbabura"**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Forestal**

**Línea de investigación:** Desarrollo Agropecuario y Forestal Sostenible**.**

**Autor:** Jandry Favián Correa Diaz

**Director:** Ing. José Gabriel Carvajal Benavides, MSc

Ibarra - Ecuador 2026

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

# DIRECCION DE BIBLIOTECA

## AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACION A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### 1. IDENTIFICACION DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición lo siguiente información.

| DATOS DE CONTACTO | |
|---|---|
| **APELLIDOS Y NOMBRES:** | Correa Díaz Jandry Favián |

| DATOS DE LA OBRA | |
|---|---|
| **TÍTULO:** | "Efectos de fertilización en el crecimiento inicial de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden, Cachaco, provincia de Imbabura" |
| **AUTOR:** | Correa Díaz Jandry Favián |
| **FECHA: DD/MM/AAAA** | 08/06/2026 |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO | |
| **PROGRAMA:** | ■ **PREGRADO** □ **POSGRADO** |
| **TITULO POR EL QUE OPTA:** | Ingeniero Forestal |
| **DIRECTOR /ASESOR:** | Ing. José Gabriel Carvajal Benavides, MSc. |

### 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 8 días del mes de junio de 2026.

**EL AUTOR:**

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JANDRY FAVIAN
CORREA DIAZ

……
Jandry Favián Correa Díaz

# CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 8 de junio de 2026.

Ing. José Gabriel Carvajal Benavides, MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JOSE GABRIEL CARVAJAL BENAVIDES

……
Ing. José Gabriel Carvajal Benavides, MSc.
C.C.: 1002412052

# APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificador del trabajo de Integración Curricular "Efectos de fertilización en el crecimiento inicial de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden, Cachaco, provincia de Imbabura" elaborado por Jandry Favián Correa Díaz, previo a la obtención del título del Ingeniero Forestal, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
JOSE GABRIEL CARVAJAL BENAVIDES

…….
Ing. José Gabriel Carvajal Benavides, MSc.
C.C.:1002412052

Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
HUGO ORLANDO PAREDES RODRIGUEZ

…….
Ing, Hugo Orlando Paredes Rodrigues, MSc.
C.C.:1600285702

# AGRADECIMIENTOS

Inicio con palabras de agradecimiento a mi compañera de vida Jenny, a mi hijo Emilio. Quienes han sido una pieza fundamental en la consecución de este gran objetivo, ya que me proporcionan confianza y apoyo incondicional, permitiendo el desarrollo del proyecto necesario para perseguir mi meta. También me gustaría dar las gracias a mis padres Víctor y Narcisa, así como a mi hermano Adrián y a mis hermanas Carolina y Narcisa, a mi cuñada Itaty y mi cuñado Juan, también a mis sobrinos Víctor, Miguel y Victoria por su interminable amor y apoyo incondicional. A continuación, un inmenso agradecimiento al equipo de trabajo que lo conforman los ingenieros Gabriel Carvajal y Hugo Paredes: por todo su apoyo, trabajo y dedicación para realizar una contribución positiva al desarrollo de esta investigación.

# RESUMEN EJECUTIVO

La fertilización inicial en *E. grandis* W. Hill ex Maiden es un área poco explorada en el contexto forestal de Ecuador, debido a que el establecimiento exitoso de plantaciones forestales de rápido crecimiento depende de una nutrición mineral optima que corrija las deficiencias edáficas, esta investigación se planteó como objetivos determinar el efecto de la fertilización en el crecimiento inicial, establecer los costos de establecimiento y manejo de la plantación. Se empleó un diseño de bloques completos al azar con cuatro tratamientos: T1 (180 gr/planta), T2 (144 gr/planta), T3 (216 gr/planta) y T4 (testigo). Durante cuatro meses se evaluaron variables dasométricas (altura, DAC, diámetro de copa), área foliar específica, área foliar y concentraciones de macronutrientes. Se aplicaron pruebas de ANOVA, Tukey y Kruskal – Wallis, además análisis de costos operativos. Los resultados evidenciaron que el tratamiento T3 presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,001$) en todas las variables dasométricas, alcanzando incrementos del 55% en el diámetro a la altura del cuello y del 45% en altura en comparación con el tratamiento testigo. Desde una perspectiva fisiológica, estos resultado sugieren una mayor eficiencia en la absorción y utilización de nutrientes lo que favorece procesos como la división celular y el desarrollo estructural de la planta. En cuanto al análisis foliar se identificaron valores óptimos de nitrógeno (22,80 g/kg) y fósforo (1,70 gr/kg) en el tratamiento T3. No obstante, las variables relacionadas con el área foliar no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p>0,05$), lo que indica que la fertilización no tuvo un efecto determinante sobre esta variable bajo las condiciones del ensayo. Desde el punto de vista económico, el costo de establecimiento se estimó en 1796,67 USD/ha, donde los insumos representaron el 45,96% de la inversión total. Se concluyó que la dosis de 216 gr/planta maximiza el crecimiento inicial mediante una nutrición eficiente.

**Palabras clave**: Silvicultura intensiva; Cambium vascular; Nutrición foliar; análisis de costos; *E.grandis;* Crecimiento inicial; Plantación; Fertilización; NPK.

# ABSTRACT

Initial fertilization of E.grandis W. Hill ex Maiden is a relatively unexplored area within the Ecuadorian forestry context. Because the successful establishment of fast-growing forest plantations depends on optimal mineral nutrition to correct soil deficiencies, this research aimed to determine the effect of fertilization on initial growth and to establish the costs of plantation establishment and management. A randomized complete block design with four treatments was used: T1 (180 g/plant), T2 (144 g/plant), T3 (216 g/plant), and T4 (control). For four months, dendrometric variables (height, DBH, crown diameter), foliar biomass, and macronutrient concentrations were evaluated. ANOVA, Tukey, and Kruskal-Wallis tests were applied, along with an analysis of operating costs. The results showed that treatment T3 exhibited statistically significant differences ($p < 0.001$) in all dasometric variables, achieving increases of 55% in diameter at the crown and 45% in height compared to the control treatment. From a physiological perspective, these results suggest greater efficiency in nutrient absorption and utilization, which favors processes such as cell division and the plant's structural development. Regarding foliar analysis, optimal values for nitrogen (22.80 g/kg) and phosphorus (1.70 g/kg) were identified in treatment T3. However, the variables related to leaf area did not show statistically significant differences ($p > 0.05$), indicating that fertilization did not have a determining effect on this variable under the trial conditions. From an economic standpoint, the establishment cost was estimated at USD 1996.29/ha, with inputs representing 45.87% of the total investment. It was concluded that the dose of 216 g/plant maximizes initial growth through efficient nutrition.



**Keywords:** Intensive forestry; Vascular cambium; Foliar nutrition; Cost analysis; E.grandis; Initial growth; Planting; Fertilization; NPK.

# LISTA DE SIGLAS

**COA.** Código Orgánico ambiental

**MAE**. Ministerio del Ambiente del Ecuador.

**MAG.** Ministerio de Agricultura y Ganadería

**FAO**. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

**INAMHI.** Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Problema de investigación. ..... 14
Justificación ..... 15
Objetivos ..... 18
Objetivo General ..... 18
Objetivos Específicos ..... 18
Hipótesis ..... 18
1.1 Fundamentación teórica. ..... 19
1.1.1 Botánica sistemática de E. grandis. ..... 20
1.1.2 Origen y taxonomía ..... 21
1.1.3 Morfología y anatomía ..... 21
1.1.4 Eco fisiología de crecimiento ..... 22
1.1.5 Fundamentos de las plantaciones forestales ..... 23
1.1.6 Inicio de las plantaciones forestales. ..... 24
1.1.7 Plantaciones forestales en Ecuador. ..... 26
1.1.8 Manejo silvícola de eucalipto ..... 27
1.1.9 Densidad, competencia y dinámica de los rodales ..... 29
1.1. 10 Nutrición vegetal en especies forestales ..... 29
1.2 Historia de la fertilización en plantaciones ..... 30
1.2.1 Principios básicos de la nutrición vegetal ..... 30
1.2.2 Macro y micronutrientes esenciales en las plantaciones. ..... 31
1.3 Efectos del NPK en las especies forestales ..... 32
1.3.1 Funciones de N, P y K. ..... 33
1.3.2 Deficiencia nutricional en las plantaciones de eucalipto ..... 34
1.3.3 Nutrición forestal ..... 34
1.4 Conceptos de fertilización ..... 35
1.4.1 Fertilidad natural ..... 36
1.4.2 Fertilizantes ..... 36
1.5 Limitaciones del suelo en sistemas forestales ..... 39
1.6 Demanda nutricional de Eucalyptus ..... 40
1.7 Respuesta de *E.grandis* a la fertilización con distintas dosis de NPK ..... 40
1.8 Resultados de estudios recientes sobre fertilización de plantaciones ..... 41
1.8.1 Crecimiento y desarrollo de E. grandis. ..... 42

1.9 Variables morfológicas: diámetro, altura, diámetro de copa .....43
2.1 Tipo de investigación .....45
2.2 Ubicación del lugar y caracterización biofísica .....45
2.2.1 Geografía del sitio investigación .....46
2.2.2 Límites .....46
2.2.3 Caracterización edafoclimática del lugar .....47
2.2.4 Clima .....47
2.3. Materiales, equipos y software .....48
2.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Investigación. .....48
2.4.1. Diseño Experimental y Tratamientos .....48
2.4.2. Protocolo de Aplicación Nutricional (Fertilización). .....50
2.4.3. Instalación del experimento .....52
2.4.3.1. Preparación de sitio de plantación .....52
2.4.3.2. Muestreo de suelo .....53
2.4.3.3. Preparación del terreno .....53
2.4.3.4. Marcado y apertura de hoyos .....54
2.4.3.5. Establecimiento de la plantación .....54
2.5 Sistema de Variables e Indicadores .....57
2.5.1. Variables Biométricas y fisiológicas (Objetivo 1.- Determinar el efecto de la fertilización en el crecimiento inicial de la especie.) .....57
2.6. Procedimiento Estadístico y Procesamiento de Datos. .....64
3.1 Resultados para el objetivo 1: Determinar el efecto de la fertilización en el crecimiento inicial de la especie. .....65
3.1.1 Resultados biométricos .....65
3.1.2 Incremento en altura total de la planta (cm). .....65
3.1.3 Incremento en diámetro a la altura del cuello (cm). .....68
3.1.4 Incremento de diámetro de copa (cm). .....70
3.2 Resultados fisiológicos (Área foliar, área foliar específica y Análisis foliar). .....71
3.2.1 Área foliar .....71
3.2.2 Área foliar específica. .....73
3.2.3 Análisis foliar .....74
3.3 Resultados para el objetivo 2: Establecer los costos de establecimiento y manejo de la plantación. .....77
3.3.1 Costos de Mano de obra .....80
3.3.2 Costo de insumos .....80

3.3.3 Costo de Mantenimiento ..... 81
4.1 Conclusiones ..... 83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA ..... 85

# ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1** Materiales, equipos y software a emplear en la investigación. 48

**Tabla 2** Despripcion y valores definidos en el ensayo 50

**Tabla 3** Recomendación del laboratorio Labornort con base al análisis de suelo para la corrección nutricional en el establecimiento de plantación de *E.grandis.* 50

**Tabla 4** Interpretacion de analisis foliar de *E. grandis* de acuerdos con los diferentes fuentes. 67

**Tabla 5** Matriz de costos unitarios y proyecciones para el establecimiento del año de *E. grandis* 78

**Tabla 6** Relación de inversión - beneficio entre el tratamiento T3 y T4 (control) 50

# ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1** Mapa de Ubicación del área de estudio. 32

**Figura 2** Distribución de unidades experimentales en cada bloque 39

**Figura 3** Patrón de muestreo 46

**Figura 4** Comportamiento del incremento de la altura total de E.grandis según los niveles de fertilización. 53

**Figura 5** Respuesta del incremento del diámetro a la altura del cuello en E.grandis según el nivel de fertilización. 56

**Figura 6** Efecto de la dosis de fertilización NPK sobre la expansión diametral de la copa en E.grandis. 58

**Figura 7** Superficie foliar promedio del E.grandis bajo diferentes niveles de fertilización. 60

**Figura 8** Comportamiento del área foliar específica en E.grandis 62

**Figura 9** Comportamiento de los niveles de fertilización en el análisis foliar. 64

# INTRODUCCIÓN

**Problema de investigación.**

En Ecuador existen deficiencias en los estudios sobre fertilización en plantaciones forestales. Aunque el país cuenta con una industria forestal en crecimiento, especialmente en especies como *E. grandis*, *Pinus radiata* y *Tectona grandis*, los estudios específicos sobre prácticas de fertilización y manejo de suelos para optimizar el crecimiento de estas especies son limitados

En la provincia de Imbabura específicamente en el sector de Cachaco, los suelos evidencian restricciones notables en su capacidad productiva, asociadas principalmente a una baja disponibilidad de nutrientes esenciales como el nitrógeno, fósforo y potasio. En este sentido dichas limitaciones nutricionales constituyen un obstáculo relevante para el adecuado establecimiento y el crecimiento temprano de plantaciones de *E. grandis*, esta especie es reconocida por su elevado potencial económico, ya que es ampliamente empleada en sistemas forestales comerciales (Machacuay y Llancari, 2020).

La fase de crecimiento inicial *E. grandis* constituye una etapa determinante, pues en ella se configura su capacidad de adaptación al medio y se proyecta su desempeño productivo futuro. No obstante, cuando el establecimiento se realiza en suelos de baja fertilidad, como ocurre en el sector Cachaco, las restricciones nutricionales pueden disminuir la eficiencia en la absorción y aprovechamiento de recursos, limitar el desarrollo del sistema radicular y de la parte aérea y en consecuencia afectar la productividad del rodal a mediano y largo plazo.

En la provincia de Imbabura, estudios de correcciones nutricionales de suelos a través de la fertilización con macronutrientes para el establecimiento de plantaciones forestales son limitados, esto se debe a que las indagaciones son realizadas por empresas privadas dedicadas al establecimiento de plantaciones, por tanto, se dificulta el acceso a la información generada.

Por tal razón, surge la necesidad de trabajar en estudios de fertilización en especies forestales de interés comercial con la finalidad de mejorar la productividad (López y Muñoz, 2017).

El estudio edafológico efectuando en el sector de Cachaco evidenció concentraciones reducidas de fósforo y potasio elementos fundamentales para el crecimiento y desarrollo óptimo de *E. grandis*. En este sentido, dichas limitaciones nutricionales ponen de manifiesto que la necesidad de definir estrategias técnicas de fertilización que permitan restituir el equilibrio del suelo, por consiguiente, resulta imprescindible determinar prácticas y dosis adecuadas que contribuyan a corregir estas deficiencias, favoreciendo un establecimiento más eficiente de las plantaciones y garantizando su sostenibilidad y productividad en el largo plazo.

El problema central se enmarca en determinar cómo las dosis de fertilizantes minerales aplicadas en la corrección de las deficiencias de fósforo y potasio en suelos del sector Cachaco, influyen en el crecimiento inicial de *E. grandis.*

**Justificación**

Según Gonçalves et al. (2019) las restricciones de la productividad en plantaciones de *E.grandis* están relacionadas con los siguientes factores, en orden de importancia: déficit hídrico, deficiencia de nutrientes, profundidad y resistencia del suelo. Las investigaciones desarrolladas sobre los efectos que produce la fertilización en el crecimiento inicial de las plantaciones forestales, son indispensables, ya que aportan datos útiles para promover un desarrollo rural sostenible que garantice la reducción de turnos de corta y aumento del volumen de madera producido. Además, estos datos técnicos contribuyen a recuperar áreas degradadas, el cual fortalece los procesos de restauración ambiental, generando nuevas fuentes de ingresos económicos en beneficio de las personas del área de influencia.

Imbabura enfrenta procesos de degradación de suelos, pérdida de cobertura vegetal y bajos ingresos por actividades agrícolas y aumento de actividades de extracción minera. Por tal razón, es importante implementar sistemas de producción forestal con especies de rápido crecimiento que se adapten a las condiciones edafoclimáticas de la zona, el cual presenta una alternativa viable con la finalidad de dinamizar la economía local.

El incremento de la productividad en sistemas forestales constituye un elemento fundamental para el crecimiento económico sostenible, particularmente en las zonas rurales de la Sierra ecuatoriana. Modelos de evaluación financiera en la provincia de Imbabura han evidenciado que la optimización de los costos de establecimiento y la planificación del manejo técnico son directamente proporcionales al aumento de la rentabilidad para las comunidades locales (Carvajal Benavides et al.,2023). De igual forma, el diseño y la implementación de sistemas productivos integrados deben respetar la diversidad edafoclimática y maximizar el beneficio - costo, reduciendo la presión sobre bosques nativos y asegurando la sostenibilidad a largo plazo (Carvajal Benavides et al., 2024). En ese sentido, el manejo silvicultural basado en prácticas técnicamente fundamentadas, como la fertilización con NPK, permiten optimizar el crecimiento inicial, mejorar la eficiencia de uso y reducir los tipos de rotación.

El cultivo de *E. grandis* representa una alternativa económicamente viable y una fuente importante de materia prima para diversas industrias, debido su rápido crecimiento de 3 a 6 m por año, versatilidad y su capacidad de adaptación a distintas condiciones climáticas y edáficas Gonzáles et al. (2019). En la provincia de Imbabura, se ha observado que el 84% de los productores que realizan aprovechamiento de bosques cultivados poseen área de plantación menores a cinco hectáreas, lo que muestra una participación significativa de los pequeños productores en actividades forestales (Tituaña y Nicolalde, 2019).

En ese contexto, las plantaciones de eucalipto no solo fortalecen la actividad forestal, sino que también generan oportunidades de empleo para las comunidades rurales, es decir, actividades como el establecimiento, mantenimiento y aprovechamiento de las plantaciones contribuyen a dinamizar la economía local y representa una fuente importante de ingresos para muchas familias vinculadas al sector forestal. Sin embargo, su sostenibilidad ambiental y viabilidad económica depende en gran medida del acceso a conocimientos técnicos especializados particularmente en prácticas silviculturales como la fertilización. Por tanto, la difusión y el acceso a esta información entre pequeños productores sigue siendo limitada (Santos y Reichert, 2022). La fertilización en plantaciones de *E. grandis* es una práctica silvicultural esencial para optimizar el crecimiento y la productividad, especialmente en regiones donde los suelos presentan limitaciones nutricionales debido a actividades agrícolas intensivas previas.

El estudio de efectos de fertilización en el crecimiento inicial de *E. grandis* generará beneficios tanto directos como indirectos, entre los que se destacan son los productores forestales y propietarios de tierras que tengan las condiciones climáticas, edáficas similares al sector de estudio, obteniendo ingresos adicionales a través producción, transformación y venta de madera y productos derivados. Así mismo, mejorará la producción, reducirá los ciclos de rotación, aumentará la oferta y la rentabilidad de la madera (Talles et al.,2022).

## Objetivos

### *Objetivo General*

Evaluar la respuesta de la fertilización en el crecimiento inicial de *E. grandis* Hill ex Maiden en plantación, en Cachaco, provincia de Imbabura.

### *Objetivos Específicos*

- Determinar el efecto de la fertilización en el crecimiento inicial de la especie.
- Establecer los costos de establecimiento y manejo de la plantación.

## Hipótesis

**$H_A$:** Al menos uno de los tratamientos tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el crecimiento dasométrico y biomasa aérea de *E. grandis en* el sector "Cachaco".

**$H_0$**: Todos los tratamientos tienen un efecto estadísticamente igual sobre el crecimiento dasométrico y biomasa área de *E. grandis* en el sector "Cachaco".

# CAPÍTULO I
# MARCO TEÓRICO

## 1.1 Fundamentación teórica.

La botánica sistemática de *E. grandis* constituye un componente fundamental para la comprensión científica de esta especie forestal, ya que permite su correcta identificación, clasificación y diferenciación frente a otras especies del mismo género. En definitiva, el enfoque integra criterios taxonómicos, morfológicos y anatómicos que facilitan el análisis de su comportamiento fisiológico y su adaptación a distintos ambientes edafoclimáticos (Monteoliva et al., 2015). En el contexto forestal, el conocimiento sistemático resulta esencial para orientar decisiones técnicas relacionadas con el manejo silvícola, la nutrición vegetal y la productividad de las plantaciones.

Desde el punto de vista taxonómico, *E. grandis* pertenece al Reino Plantae, División Magnoliophyta, Clase Magnoliopsida, Orden Myrtales y Familia Myrtaceae, caracterizándose por su rápido crecimiento y elevada plasticidad ecológica. En la misma línea, Monteoliva y Barotto (2015) indican que esta especie se caracteriza por presentar un fuste recto, corteza lisa de tonalidad clara y hojas de forma lanceolada, es por eso que tales atributos morfológicos evidencian que existe una elevada eficiencia fotosintética y una marcada capacidad de adaptación a diversos ambientes, aspectos que han sido determinantes para su amplia utilización en plantaciones forestales con fines comerciales.

En el marco de esta investigación, la botánica sistemática de *E. grandis* resulta fundamental ya que permite comprender de qué manera su estructura morfológica y su funcionamiento fisiológico condicionan la respuesta frente a prácticas silviculturales como la fertilización. En este sentido, el análisis de su sistema radicular y de su dinámica de crecimiento inicial se vuelve determinante pues facilita interpretar como la disponibilidad de

nutrientes incide en variables dasométricas y en la formación de biomasa aérea. Por tanto, el análisis sistemático de la especie constituye una base científica indispensable para evaluar de manera objetiva la respuesta del crecimiento inicial de *E. grandis* bajo diferentes dosis de fertilización en condiciones edáficas específicas.

### *1.1.1 Botánica sistemática de E. grandis.*

La botánica sistemática de *E. grandis* permite comprender de manera integral la identidad biológica de la especie, a partir de su clasificación científica y de sus características estructurales distintivas. De tal manera, este campo del conocimiento resulta esencial en estudios forestales, ya que facilita la correcta selección de especies para plantaciones comerciales y contribuye a interpretar su comportamiento productivo, fisiológico y adaptativo en diferentes condiciones ambientales (Imbaquingo, 2021).

Imbaquingo (2021) señala que la especie pertenece a la familia *Myrtaceae,* el cual agrupa a especies de característica leñosa reconocidas por su rápido crecimiento y considerable importancia económica. Es decir, la especie se caracteriza por poseer hojas simples, dispuestas de manera alterna y con forma lanceolada, además de inflorescencias axilares y un sistema vascular altamente funcional. Las particularidades estructurales favorecen un desarrollo rápido y óptimo y favorecen la eficiencia en la absorción y aprovechamiento de los nutrientes disponibles en el suelo.

En el desarrollo de la investigación, el análisis de la botánica sistemática de *E. grandis* cobra especial relevancia, ya que permite la vinculación de atributos morfológicos y anatómicos con la respuesta registrada ante la fertilización inicial. Por eso, la disposición y funcionalidad de sus tejidos conductores junto con el desarrollo temprano del sistema

radicular incide de manera directa en la eficiencia de absorción y movilización de nutrientes, lo cual se refleja en el incremento de las variables dasométricas.

### 1.1.2 Origen y taxonomía

*E. grandis* es una especie forestal originaria de Australia, donde se distribuye de forma natural en regiones subtropicales y tropicales caracterizadas por precipitaciones elevadas y suelos bien drenados. Su origen geográfico explica, en gran medida, su notable capacidad de adaptación a diversas condiciones climáticas y edáficas, lo que ha permitido su introducción y expansión en numerosos países con fines productivos, especialmente en América Latina, África y Asia (Meneses, 2016).

Desde el punto de vista taxonómico, *E. grandis* pertenece al Reino Plantae, División Magnoliophyta, Clase Magnoliopsida, Orden Myrtales y Familia Myrtaceae, siendo una de las especies más representativas del género *E.grandis* por su rápido crecimiento y alto potencial maderable. Según Meneses (2016) esta especie se clasifica dentro del subgénero *Symphyomyrtus*, grupo que reúne especies con alta eficiencia fisiológica, tronco recto y características anatómicas favorables para su aprovechamiento industrial.

En relación con la presente investigación, el conocimiento del origen y la taxonomía de *E.grandis* resulta fundamental para interpretar su comportamiento frente a prácticas silviculturales como la fertilización, su procedencia de ambientes con suelos naturalmente pobres en nutrientes lo que ha favorecido una elevada respuesta fisiológica a la disponibilidad de elementos minerales, particularmente durante las etapas iniciales de crecimiento.

### *1.1.3 Morfología y anatomía*

La fisiología, morfología y anatomía de *E.* grandis son aspectos importantes para comprender el comportamiento de la especie y conocer el potencial productivo que tiene en

sistemas forestales comerciales. Las características fisiológicas estructurales influyen directamente en la capacidad que tiene la planta en captar la luz solar, absorber nutrientes esenciales y adaptarse a diferentes entornos edafoclimáticos. Estas condiciones permiten explicar cómo esta especie es ampliamente utilizada en programas de forestación y reforestación a nivel mundial (Guarnaschelli y Mantese, 2019).

*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden es una especie forestal de rápido crecimiento, que presenta un tronco recto, cilíndrico y una copa relativamente estrecha con hojas simples y alternas. La forma de la copa favorece una adecuada captación y la disposición de las hojas ayuda a disminuir la pérdida excesiva de agua y aprovechar la radiación solar que favorece los procesos fotosintéticos de la especie (Guarnaschelli y Mantese, 2019). En cuanto a su anatomía, la especie cuenta con un sistema vascular bien desarrollado en el que los tejidos de xilema y floema desempeñan un papel clave al permitir el transporte eficiente de agua y nutrientes a lo largo del tallo (Guarnaschelli y Mantese, 2019).

En relación con el presente estudio, la morfología y anatomía de *E. grandis* desempeñan un papel determinante en la respuesta a la fertilización inicial. El desarrollo temprano del sistema radicular, junto con la eficiencia de los tejidos conductores, permite una rápida absorción y movilización de nutrientes aplicados al suelo, lo cual se refleja en el incremento de variables dasométricas y de biomasa aérea.

### *1.1.4 Eco fisiología de crecimiento*

La eco fisiología del crecimiento de *E. grandis* estudia la interacción entre los procesos fisiológicos de la especie y las condiciones ambientales en las que se desarrolla, permitiendo comprender cómo factores como el suelo, el clima y la disponibilidad de nutrientes influyen en su crecimiento y productividad. De tal manera, el enfoque resulta

fundamental en estudios forestales, ya que explica la capacidad de adaptación de la especie a distintos ecosistemas y su respuesta frente a prácticas silviculturales orientadas a optimizar su desarrollo inicial (FAO, 2020).

Desde una perspectiva fisiológica, *E. grandis* presenta una alta eficiencia fotosintética, asociada a una rápida tasa de asimilación de carbono y a un uso eficiente del agua y los nutrientes. Asimismo, su sistema radicular se caracteriza por un crecimiento temprano y profundo, lo que le permite explorar mayores volúmenes de suelo y aprovechar de manera efectiva los nutrientes disponibles. Según la FAO (2020) la disponibilidad adecuada de macronutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio es determinante para sostener procesos fisiológicos como la división celular, la elongación de tejidos y la formación de biomasa aérea.

En relación con la presente investigación, la ecofisiología del crecimiento de *E. grandis* permite explicar la respuesta diferencial observada frente a las distintas dosis de fertilización aplicadas. Durante las etapas iniciales de establecimiento, la especie presenta una elevada demanda nutricional para el desarrollo de hojas, tallos y raíces, lo que hace que la disponibilidad de nutrientes en el suelo incide directamente en las variables dasométricas evaluadas (FAO, 2020) Por tanto, comprender los principios eco fisiológicos del crecimiento contribuye a interpretar los efectos de la fertilización sobre el crecimiento inicial de *E. grandis* en condiciones edáficas específicas, fortaleciendo la base científica del estudio.

### *1.1.5 Fundamentos de las plantaciones forestales*

Según Tituaña y Nicolalde (2019) las plantaciones forestales se definen como la superficie arbolada obtenida de formaciones antrópicas mediante siembra o plantación de especies forestales en zonas desprovistas de vegetación, con fines productivos, ecológicos o

de restauración. Constituyen una alternativa económica importante al brindar recursos como madera, resinas, aceites esenciales, papel, entre otros servicios no madereros.

Desde el punto de vista ambiental, las plantaciones forestales aportan beneficios importantes ya que contribuyen a la captura de carbono, la conservación de los suelos y la recuperación de áreas degradadas y la prohibición de hábitats para diversas especies de fauna silvestre. Es por eso, que cuando son establecidas y manejadas de manera adecuada, también generan impactos positivos en las comunidades cercanas al crear oportunidades de empleo, fortalecer el desarrollo local y disminuir la presión sobre los bosques nativos Tituaña y Nicolalde, 2019).

Las plantaciones forestales y agroforestales requieren una planificación integral. Por lo tanto, las investigaciones desarrolladas con enfoques de corrección de suelos en la región andina del Ecuador deben estar enmarcadas hacia modelos productivos eficientes que garanticen el máximo potencial de las especies forestales Carvajal Benavides, 2024). Para la selección de fuentes semilleras para el desarrollo de plantaciones forestales es necesario la identificación botánica y respaldo taxonómico de las especies empleadas, apoyados por colecciones de referencias locales como el Herbario HUTN (Paredes Rodríguez et al., 2023).

### *1.1.6 Inicio de las plantaciones forestales.*

La humanidad ha plantado árboles desde hace miles de años con diversos objetivos, entre los que se destacan la producción de alimentos, madera, gomas, resinas, taninos y fines ornamentales. En el mediterráneo se data que las plantaciones se establecieron cerca de los 4 mil años A. C. El inicio del concepto de plantaciones forestales como cultivo agrícola intensivo tiene sus raíces en el siglo XIX, cuando países europeos como Alemania, Francia y los Países bajos comenzaron a establecer rodales artificiales de coníferas para satisfacer la demanda de madera para la industria industrial.

En Alemania se desarrollaron los primeros sistemas de ordenación forestal basados en plantaciones regulares de abeto noruego (*Picea abies)* y pino silvestre (*Pinus sylvestri*), con rotaciones de 80 a 120 años. Así mismo, en Reino Unido establecieron plantaciones de coníferas después de la Primera Guerra Mundial para reducir la dependencia de importaciones de maderas. También Nueva Zelanda y Australia iniciaron programas de plantaciones de *E. grandis* y *Pinus radiata* a finales del siglo XIX, sentando las bases para el siglo moderno.

La segunda mitad del siglo XIX entre 1950 y 1980 marcó una expansión masiva de las plantaciones forestales en regiones tropicales y subtropicales impulsadas por el desarrollo industrial, mejoramiento genético y tecnología silvícola. La creciente demanda de celulosa y papel para el desarrollo industrial fueron los factores que estimularon las inversiones en plantaciones de rápido crecimiento (Imbaquingo, 2021). Así mismo, la ciencia aportó con programas de mejoramiento genético de las especies más plantadas para esa época que eran *E. grandis* **y** *Pinus,* y los resultados positivos incrementaron significativamente la productividad de las plantaciones. La tecnología dio un realce importante con la mecanización y el desarrollo de técnicas de fertilización y control de plagas permitiendo cultivos más intensivos (González y Duff, 2023).

Uno de los países pioneros en el establecimiento de plantaciones de eucalipto en la región es Brasil, que en 1960 a 1980, establecieron más de tres millones de hectáreas para abastecer la industria de celulosa y siderurgia de Chile y Argentina**.** Desde 1980 hasta la actualidad, la evolución de las plantaciones forestales a nivel mundial ha estado marcadas por el uso de clones y biotecnología, que mediante la propagación de clones élite de *E. grandis* y otras especies, han permitido incrementos de productividad de 30 al 50% en comparación con las seminales. De tal modo que el avance ha estado acompañado de un manejo silvícola más intensivo, basado en prácticas como fertilización, riego y el control de competencia entre

plantas. Gracias a ello, se ha logrado acelerar el crecimiento de las plantaciones y reducir los ciclos de rotación a periodos de entre cinco y siete en eucalipto. (Tituaña y Nicolalde, 2019). De manera paralela, las certificaciones FSC (Forest Stewardship Council) y PEFC Programme for the Endorsement of Forest Certification), han promovido prácticas de manejo mas sostenibles dentro del sector forestal. De tal modo, estas iniciativas impulsan el establecimiento de plantaciones que además de producir madera, contribuyen a la captura de carbono , recuperación de suelos degradados y la implementación de sistemas agroforestales. En la actualidad, las plantaciones forestales ocupan alrededor de 290 millones de hectáreas a nivel mundial, lo que representa cerca del 7% de la superficie forestal global y aporta aproximadamente la mitad de la madera esta destinada a la industria (Ipinza y Barros, 2021).

### *1.1.7 Plantaciones forestales en Ecuador.*

De acuerdo con el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (2018) menciona que la historia de las plantaciones forestales en Ecuador refleja la dinámica económica, política y ambientales del siglo XX y XXI a diferencia de otros países como Brasil o Chile, donde alcanzaron escalas industriales temprana, el desarrollo en Ecuador ha sido más modesto, pero con avances significativos en las últimas décadas.

De acuerdo con la (FAO, 2020) el *E. grandis* posee una notable relevancia socioeconómica en distintas regiones del mundo principalmente por su elevado valor comercial y su amplia versatilidad en usos industriales. En este sentido, su aprovechamiento se orienta hacia la producción de madera, papel y biomasa con fines energéticos, lo que aporta de manera significativa al desarrollo económico de aquellos países que han incorporado esta especie en sistemas de plantaciones a gran escala.

En diversas regiones, las plantaciones de *E. grandis* constituyen una fuente relevante de empleo e ingresos para las comunidades locales, por su rápido ritmo de crecimiento permite realizar aprovechamientos en periodos relativamente cortos, lo que incrementa la

rentabilidad de las inversiones forestales. Asimismo, su uso en la industria papelera y en la producción de madera para construcción contribuye a disminuir la presión sobre los bosques nativos, favoreciendo así modelos de producción más sostenible (Enríquez, 2018).

El cultivo de *E. grandis* también ha contribuido al desarrollo rural en áreas que anteriormente no contaban con actividades productivas significativas, al establecer plantaciones, se generan oportunidades de empleo en actividades como la plantación, el mantenimiento, la cosecha y el procesamiento de la madera. Por lo tanto, impulsa la economía local y mejora las condiciones de vida de las comunidades rurales para asegurar que el desarrollo económico no cause impactos negativos en el medio ambiente ni en la disponibilidad de recursos hídricos (Imbaquingo, 2021).

### *1.1.8 Manejo silvícola de eucalipto*

Según Fonseca et al. (2023) menciona que el manejo silvicultural de las plantaciones constituye un factor determinante para el crecimiento económico rural, al incrementar la productividad, genera empleo y fortalece los encadenamientos productivos asociados al entorno forestal. En ese contexto, la fertilización balanceado con NPK en la etapa inicial de crecimiento de *E. grandis* representa una práctica clave para optimizar el rendimiento de las plantaciones, mejorar la eficiencia del uso de suelo y reducir los tiempos de rotación.

El manejo silvícola del eucalipto reúne las acciones técnicas que se aplican desde la plantación hasta su aprovechamiento, con el fin de lograr un crecimiento eficiente y sostenible. En esencia incluye decisiones clave como la preparación del terreno, la elección de plantas, la densidad de siembra y el manejo del cultivo como en la fertilización, control de malezas y sanidad. Sin embargo, su efectividad depende de que estas prácticas se adapten a las condiciones del suelo y del clima ya que esto determina en gran medida el desarrollo adecuado de la especie (Osorio, 2012).

Según Eufrade y Ballarin (2017) un manejo silvícola adecuado en plantaciones de *Eucalyptus* permite maximizar el rendimiento maderable y mejorar la calidad del fuste. En este sentido, se destaca que la fertilización temprana constituye una de las prácticas más determinantes durante las fases iniciales, ya que favorece el establecimiento, el desarrollo radicular y la uniformidad del crecimiento. Asimismo, la densidad de plantación y el control oportuno de la competencia influyen directamente en la disponibilidad de recursos como agua, luz y nutrientes, condicionando el comportamiento fisiológico de los árboles.

En relación con la presente investigación, el manejo silvícola adquiere especial relevancia al analizar la fertilización como una herramienta técnica para mejorar el crecimiento inicial de *E. grandis*. La aplicación de diferentes dosis de fertilizante forma parte de un manejo nutricional estratégico que busca corregir deficiencias del suelo y potenciar el desarrollo dasométrico y la biomasa aérea en las primeras etapas de la plantación (Eufrade y Ballarin, 2017). Por tanto, evaluar la respuesta de la especie a la fertilización permite generar información técnica que contribuya a optimizar el manejo silvícola del eucalipto en condiciones edáficas similares a las del sector Cachaco, promoviendo sistemas forestales productivos y sostenibles.

La viabilidad del recurso forestal y su gestión adecuada depende estrictamente de un aprovechamiento planificado. Evaluaciones de especies de interés económico en el Ecuador demuestra que las alteraciones en las tasas de extracción y las deficiencias en las labores silviculturales comprometen el futuro del rodal (Carvajal Benavides et al., 2023). Esto resalta la importancia de estudios de diagnóstico exhaustivos que permitan aplicar medidas correctivas a tiempo, ya sea en tornos de bosque comercial o de arbolado urbano, previniendo el deterioro de las características mecánicas y biológicas de las maderas (Garrido Aguilar et al., 2023; Carvajal Benavides et al., 2023)

### *1.1.9 Densidad, competencia y dinámica de los rodales*

La densidad de plantación, la competencia entre individuos y la dinámica de los rodales constituyen factores determinantes en el crecimiento y desarrollo de las plantaciones forestales de eucalipto. El crecimiento y desarrollo de las plantaciones forestales están estrechamente relacionados con la disponibilidad de luz, agua y nutrientes del suelo (Guerra y Mosquera, 2014). Por esta razón, una planificación adecuada contribuye a optimizar el uso de los recursos que favorece el incremento de la productividad y promueve la sostenibilidad de las plantaciones forestales a lo largo del tiempo.

### *1.1.10 Nutrición vegetal en especies forestales*

La nutrición vegetal en especies forestales constituye un proceso esencial para el crecimiento, desarrollo y productividad de los árboles, ya que involucra la absorción, transporte y utilización de nutrientes minerales indispensables para el cumplimiento de funciones fisiológicas y estructurales. En las plantaciones forestales, una nutrición adecuada es fundamental para lograr un buen establecimiento ya que permite el crecimiento inicial y vigoroso, Por lo cual, permite aprovechar todos los recursos disponibles en el suelo y contribuye a mantener la productividad y sostenibilidad del sistema forestal a largo plazo, especialmente en área donde existen deficiencias nutricionales (Guerra y Mosqueira, 2014)

Desde un punto de vista fisiologico, los árboles forestales necesitan una adecuada disponibilidad de macro y micro nutrientes para llevar a cabo procesos esenciales como la fotosíntesis, la respiración y la división celular y la formación de nuevos tejidos. Las deficiencias nutricionales, particularmente de nitrógeno, fósforo y potasio, pueden provocar alteraciones en el crecimiento radicular, reducción del área foliar y disminución del vigor de las plantas (Guerra y Mosqueira, 2014).

En el presente estudio, la nutrición vegetal es fundamental para comprender como responde *E. grandis* a la fertilización en sus primeras etapas, cuando los nutrientes son adecuados la planta desarrolla mejor sus raíces y su parte aérea, lo que se refleja en un crecimiento más evidente. Por ello, analizar la nutrición permite interpretar los efectos de las distintas dosis aplicadas y orientar un manejo más eficiente en condiciones de suelo similares.

## 1.2 Historia de la fertilización en plantaciones

La aplicación de fertilización química en plantaciones forestales se originó a mediados del siglo XX, cuando la demanda de madera y productos forestales comenzó a superar la capacidad de producción de los bosques naturales. A medida que los bosques primarios disminuían y la presión sobre los ecosistemas aumentaba, los investigadores y forestales buscaron técnicas para mejorar la eficiencia y el rendimiento de las plantaciones forestales comerciales (Rodríguez y Álvarez, 2020).

Durante este periodo se evidenció que la fertilización aporta mayores beneficios en las primeras etapas del crecimiento cuando las plántulas forman su sistema radicular y necesitan nutrientes para establecerse adecuadamente. Con el avance de la tecnología agrícola se desarrollaron fertilizantes más específicos según el tipo de suelo y la especie, lo que permitió mejorar la eficiencia y reducir impactos ambientales. En la actualidad, la fertilización química es práctica habitual en plantaciones forestales y la investigación continúa enfocándose en ajustar dosis que favorezcan el crecimiento sin afectar el equilibrio del ecosistema (García, 2023).

### *1.2.1 Principios básicos de la nutrición vegetal.*

Los principios básicos de la nutrición vegetal se fundamentan en la absorción, transporte y utilización de los nutrientes minerales que las plantas requieren para su

crecimiento y desarrollo. Los nutrientes son incorporados principalmente a través del sistema radicular en forma de iones disueltos en la solución del suelo, y posteriormente se movilizan hacia los diferentes órganos de la planta mediante los tejidos conductores. Una nutrición adecuada permite que la planta funciones de manera eficiente facilitando procesos clave como la fotosíntesis, la respiración y la formación de compuestos necesarios para su crecimiento y desarrollo (Vera, 2020).

De igual manera, la cantidad y el balance de nutrientes en el suelo condicionan el aprovechamiento de los recursos por parte de las plantas forestales, Tanto la falta como el exceso de ciertos elementos pueden provocar alteraciones fisiológicas que limita el crecimiento, disminuyen la biomasa y afectan sus capacidad de adaptación al entorno. En ese sentido, la fertilización contribuye una herramienta fundamental para corregir deficiencias nutricionales del sueño y mejorar las condiciones de crecimiento de las plantas, por el cual, su aplicación resulta importante durante las etapas iniciales de desarrollo, ya que en este periodo los árboles presentan una mayor demanda de nutrientes para lograr un establecimiento adecuado y un crecimiento vigoroso.

### *1.2.2 Macro y micronutrientes esenciales en las plantaciones.*

Los macronutrientes y micronutrientes son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantaciones forestales, ya que intervienen procesos biológicos que permiten la formación de tejidos y la producción de biomasa, por su adecuada disponibilidad favorece el desarrollo saludable de los árboles y contribuye a mejorar su rendimiento productivo (Paredes, 2024). Los macronutrientes, como nitrógeno, fósforo y potasio, son requeridos en mayores cantidades y cumplen funciones clave en la síntesis de proteínas, el desarrollo radicular y la regulación hídrica de las plantas. Por su parte, nutrientes secundarios como

calcio, magnesio y azufre contribuyen a la estabilidad celular, la fotosíntesis y la activación enzimática.

De manera complementaria, los micronutrientes, aunque requeridos en menores concentraciones, resultan igualmente esenciales para el adecuado funcionamiento metabólico de las especies forestales, elementos como hierro, zinc, manganeso y boro intervienen en la formación de clorofila, la regulación hormonal y la actividad enzimática, por lo que su deficiencia puede provocar alteraciones fisiológicas y reducir el crecimiento (Paredes, 2024). En este contexto, el manejo nutricional equilibrado en las plantaciones permite optimizar la disponibilidad de macro y micronutrientes, favoreciendo un desarrollo inicial vigoroso y una mayor eficiencia productiva de las especies forestales.

### 1.3 Efectos del NPK en las especies forestales

De acuerdo con Guambo et al. (2020) la aplicación de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en especies forestales influye directamente en los procesos fisiológicos responsables del crecimiento y desarrollo de los árboles. En conjunto estos macronutrientes permiten un crecimiento más equilibrado y aumentan la productividad en sistemas forestales. Por su parte, el nitrógeno favorece el crecimiento vegetativo de la planta al participar en la formación de proteínas y clorofilas, lo que contribuye a un mayor desarrollo de las hojas. En el mismo sentido, el fósforo es fundamental para el crecimiento de las raíces y para los procesos relacionados con la transferencia de la energía dentro de la planta. Otro elemento importante en el desarrollo de las plantas es el potasio (K) ya que regula el transporte de nutrientes y mejora la capacidad de la planta en absorber los nutrientes, además regula el agua ayudando a la planta a enfrentar condiciones de estrés en meses de sequía. Asimismo, León y Reyes (2016) han demostrado que la aplicación adecuada de NPK durante las etapas iniciales de establecimiento de las plantaciones forestales genera incrementos significativos

en variables dasométricas como altura y diámetro, especialmente en suelos con deficiencias nutricionales. Sin embargo, la respuesta de las especies forestales al NPK no es igual en todos los casos ya que depende de la dosis aplicada, las condiciones del sueño y las necesidades de la planta. Por ello, una fertilización bien ajustada al sitio permite mejorar el crecimiento inicial, aprovechar mejor los nutrientes y favorecer la sostenibilidad de la plantación.

### *1.3.1 Funciones de N, P y K.*

El nitrógeno, fósforo y potasio son nutrientes importantes para el crecimiento de especies forestales. En ese sentido, el nitrógeno, ayuda al desarrollo de las hojas porque participa en la formación de clorofila y proteínas, lo que permite que la planta realice mejor la fotosíntesis y tenga un crecimiento más saludable. Por su parte, el fósforo interviene en la transferencia y almacenamiento de energía a través del ATP, siendo determinante para el desarrollo del sistema radicular, la división celular y la formación de tejidos estructurales (León y Reyes, 2016).

De manera complementaria, el potasio desempeña un papel clave en la regulación osmótica, el control de la apertura estomática y la activación de enzimas relacionadas con el metabolismo vegetal. Del mismo modo, este nutriente favorece el transporte de los carbohidratos dentro de la planta y le ayuda a soportar mejores periodos de escasez de agua o condiciones poco favorables del suelo (León y Reyes, 2016). Por lo cual, el nitrógeno, fósforo y potasio actúan de manera complementaria permitiendo un crecimiento mas equilibrado de las especies forestales. De esta manera, se evidencia que es sumamente importante en las etapas de desarrollo, cuando una adecuada nutrición influye directamente en el establecimiento y crecimiento de las plantaciones.

### *1.3.2 Deficiencia nutricional en las plantaciones de eucalipto*

Las deficiencias nutricionales en las plantaciones de eucalipto constituyen una de las principales limitaciones para el crecimiento y desarrollo adecuado de la especie, especialmente en suelos con baja fertilidad natural o sometidos a uso intensivo. La falta de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio se refleja en señales visibles como el amarillamiento de las hojas, menor crecimiento en altura y diámetro, un sistema radicular poco desarrollado y una disminución del vigor de la planta, lo que afecta directamente la productividad del rodal (Palma y Salgado, 2015).

De igual manera, cuando las plantas presentan deficiencias nutricionales durante las primeras etapas de crecimiento, pueden verse afectadas por un largo periodo ya que se limita su desarrollo y disminuye su capacidad para producir biomasa de forma eficiente. Por otra este motivo, el identificar a tiempo este tipo de carencias y aplicar una fertilización adecuada permite corregirlas, favoreciendo un crecimiento mas uniforme y un mejor desarrollo de las plantaciones. Por lo tanto, el manejo nutricional adecuado se convierte en una herramienta clave para mejorar el desempeño de *E. grandis* en condiciones edáficas restrictivas con las del área de estudio (Palma y Salgado, 2015).

### *1.3.3 Nutrición forestal*

La nutrición forestal estudia cómo los árboles obtienen, absorben, reutilizan y reciclan los nutrientes disponibles en el suelo. Por tal razón, es importante conocer los requerimientos nutricionales específicos de cada especies forestales, y a su vez, mejorar el manejo nutricional esto permite mejorar la productividad de las plantaciones (Alvarado, 2022).

De igual forma una buena nutrición es clave en las primeras etapas de establecimiento, y aunque este periodo los árboles necesitan más nutrientes para desarrollar

sus raíces y su parte aérea (Alvarado, 2022). Por ello, aplicar una fertilización adecuada basada en el análisis del sueño y en las necesidades de la especie, permite corregir deficiencias y favorecer un mejor crecimiento inicial. Por tanto, la nutrición forestal constituye un componente clave en el manejo silvícola de *E. grandis*, al permitir interpretar y optimizar la respuesta de la especie frente a la disponibilidad de nutrientes en condiciones edáficas específicas.

### 1.4 Conceptos de fertilización

La fertilización se define como el conjunto de prácticas orientadas a suministrar al suelo o directamente a las plantas los nutrientes esenciales necesarios para corregir deficiencias y satisfacer las demandas nutricionales de los cultivos. En el contexto forestal, la fertilización es una práctica clave para mejorar el establecimiento, el crecimiento y la productividad de las plantaciones sobre todo en suelos con baja fertilidad o afectados por usos anteriores (Morocho, 2016).

En ese sentido, la fertilización forestal debe aplicarse de forma planificada con bases teóricas tomando en cuenta el análisis de suelo, condiciones del terreno en cuanto a la especie se debe considerar la etapa de crecimiento. La aplicación adecuada permite optimizar la eficiencia en el uso de nutrientes, reducir pérdidas por lixiviación o volatilización y minimizar impactos ambientales (Morocho, 2016)

De igual manera, la fertilización forestal debe aplicarse de forma planificada y con base teórica tomando en cuenta el análisis del suelo, la especie, la etapa de crecimiento y las condiciones del entorno. Una aplicación adecuada permite optimizar la eficiencia en el uso de nutrientes, reducir pérdidas por lixiviación o volatilización y minimizar impactos ambientales (Morocho, 2016). En este contexto, la fertilización se convierte en un componente estratégico

del manejo silvícola, al contribuir al desarrollo inicial vigoroso y sostenible de especies forestales como *E. grandis*.

### *1.4.1 Fertilidad natural*

La fertilidad natural del suelo se refiere a la capacidad inherente que posee para suministrar los nutrientes esenciales necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas, sin la intervención de insumos externos. En consecuencia, la fertilidad del sueño depende de factores como el material de origen, la materia orgánica, la textura, el pH y la actividad biológica, los cuales influyen directamente en la disponibilidad de nutrientes para las especies forestales (Cabrera, 2024).

En las plantaciones forestales la fertilidad del suelo es un aspecto fundamental para asegurar un adecuado establecimiento y desarrollo de los árboles. Cuando el suelo presenta una naja disponibilidad de nutrientes, el crecimiento de las plantas puede verse limitado afectando el vigor y desempeño. Por esta razón, se puede decir que el análisis del suelo permite destacar esas diferencias y establecer programas de fertilización acorde con las condiciones del terreno (Cabrera, 2024). En este contexto, el poder comprender la fertilidad del suelo resulta clave para interpretar la respuesta de *E. grandis* y mejorar su crecimiento en condiciones específicas como las del área de estudio.

### *1.4.2 Fertilizantes*

De acuerdo con Gonzales (2020) la clasificación de los fertilizantes permite distinguir dos categorías principales en el manejo de plantaciones forestales: los fertilizantes orgánicos que provienen de materiales de origen biológico como residuos vegetales o animales y los fertilizantes inorgánicos que son elaborados mediante procesos industriales y contienen nutrientes en formas químicamente disponibles para las plantas. La diferenciación resulta fundamental para seleccionar estrategias de fertilización adecuadas en función de las

características del suelo y los requerimientos nutricionales de las especies forestales. A continuación, la explicación de cada uno (Solano, 2024):

- **Fertilizantes Orgánicos**: Los fertilizantes provienen de fuentes naturales, como estiércol, compost, y residuos de cultivos. Su uso no solo aporta nutrientes al suelo, sino que también mejora la estructura del mismo, aumentando su capacidad de retención de agua y promoviendo la actividad biológica.
- **Fertilizantes Inorgánicos**: Son compuestos sintéticos que contienen nutrientes esenciales en formas químicamente disponibles. Se dividen en dos categorías
- **Fertilizantes de liberación rápida**: Proporcionan nutrientes de manera inmediata a las plantas, ideales para aplicaciones en situaciones de alta demanda nutricional.
- **Fertilizantes de liberación controlada**: Liberan nutrientes de manera gradual, lo que permite un suministro continuo durante períodos más largos, reduciendo el riesgo de pérdida por lixiviación

**b) Nutrientes esenciales**

Los nutrientes esenciales son fundamentales para el crecimiento y desarrollo saludable de los árboles en las plantaciones forestales. Los principales grupos de nutrientes incluyen (Paredes, 2024):

- **Macronutrientes**: Son requeridos en mayores cantidades y son cruciales para funciones vitales de la planta. Incluyen el nitrógeno (N), que favorece el crecimiento vegetativo; el fósforo (P), esencial para el desarrollo radicular y la energía celular; y el potasio (K), que regula procesos hídricos y la resistencia a enfermedades.

- **Micronutrientes**: Aunque necesarios en menores cantidades, estos nutrientes, como el hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn), son igualmente importantes para procesos metabólicos y fisiológicos (Rodríguez et al., 2018). Su deficiencia puede afectar el crecimiento y la salud general de los árboles.

**c) Métodos de fertilización**

La fertilización puede llevarse a cabo mediante diversos métodos, que varían en función del tipo de fertilizante, el suelo y la especie de árbol. Los principales métodos de fertilización incluyen (Solano, 2024):

- **Fertilización al Suelo**: Consiste en la aplicación de fertilizantes directamente al suelo, donde las raíces de las plantas pueden absorber los nutrientes. El método es común para fertilizantes inorgánicos y orgánicos.
- **Fertilización Foliar**: Implica la aplicación de soluciones nutritivas directamente sobre las hojas de las plantas. Este método es eficaz para la corrección rápida de deficiencias nutricionales, especialmente de micronutrientes.
- **Inyección de Fertilizantes**: Este método se utiliza principalmente en árboles establecidos en suelos con características particulares, esto consiste en aplicar soluciones con fertilizantes directamente en el tronco o en la zona de la raíz, permitiendo que los nutrientes sean absorbidos de forma rápida y eficiente por la planta (Vega et al., 2019).

d) **Técnicas de fertilización**

Las técnicas de fertilización abarcan métodos específicos de aplicación que optimizan la eficiencia del uso de fertilizantes. Algunas de las técnicas más comunes incluyen (Solis y Quiroz, 2017):

- **Aplicación en Banda**: Los fertilizantes se aplican en surcos o franjas cercanas a la zona radicular de la planta, lo que permite que los nutrientes estén más disponibles y reduce pérdidas por procesos como la volatilización o la lixiviación.
- **Fertilización en Aberturas**: Consiste en realizar pequeñas aberturas en el suelo alrededor de la planta y añadir el fertilizante. Es útil para aplicaciones específicas en árboles ya establecidos.
- **Fertilización mediante riego**: Consiste en incorporar los fertilizantes en el agua de riego lo que permite distribuir los nutrientes de forma uniforme en todo el sistema. Es especialmente útil en plantaciones de gran escala y en suelos con baja capacidad de retención de nutrientes.

### 1.5 Limitaciones del suelo en sistemas forestales

Las limitaciones del suelo en sistemas forestales constituyen un factor determinante en el establecimiento, crecimiento y productividad de las plantaciones, ya que influyen directamente en la disponibilidad de agua y nutrientes esenciales para el desarrollo de las especies arbóreas. La uniformidad del rodal se ve afectada por las restricciones edáficas, entre las que se destaca la deficiencia nutricional, pH fuertemente ácido, pérdida de porosidad, saturación hídrica y escasa fracción húmica principales. Estas deficiencias del suelo impiden mantener un incremento adecuado de las plantaciones forestales (Enríquez, 2018). Por tal razón, hacer un estudio de suelo previo a la intervención permite identificar las restricciones edáficas y diseñar estrategias adecuadas de corrección de suelos

Por tanto, comprender las limitaciones del suelo en sistemas forestales resulta fundamental para interpretar la respuesta de *E.grandis* a la fertilización y optimizar su crecimiento inicial en condiciones edáficas específicas como las del área de estudio.

## 1.6 Demanda nutricional de Eucalyptus

Según Guambo et al. (2020) el *E. grandis* presenta un requerimiento nutricional fundamental para su crecimiento y producción de madera, que incluye tanto macronutrientes como micronutrientes. Los macronutrientes, como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), son esenciales para el desarrollo de la planta. El nitrógeno favorece la formación de proteínas y clorofila, lo que mejora el crecimiento y la fotosíntesis. El fósforo es importante para el desarrollo de las raíces y el manejo de energía en la planta mientras que el potasio ayuda a regular el agua y mejorar la resistencia a enfermedades, si alguno de estos nutrientes falta el crecimiento se ve afectado y disminuye la producción de madera.

Además de los macronutrientes, los micronutrientes como el hierro y el zinc también son esenciales, ya que su falta puede afectar la salud y el rendimiento de la planta. Por ello un manejo nutricional adecuado basado en el análisis de sueño y una fertilización equilibrada es clave para *que E.grandis* alcance un buen crecimiento (Guambo et al. 2020). Las prácticas no solo aumentan la productividad, sino que también ayudan a conservar el suelo y aumentan la productividad.

## 1.7 Respuesta de *E.grandis* a la fertilización con distintas dosis de NPK

Según García (2023) se ha demostrado que al fertilización con NPK influye directamente en el crecimiento inicial de *E. grandis,* cuando los nutrientes se aplican de forma equilibrada se favorece el desarrollo de las raíces, el aumento de hojas y el crecimiento del tallo, lo que mejora la altura y el diámetro de la planta. Sin embargo, estos resultados pueden variar según las condiciones del sueño, su nivel de fertilidad y las necesidades de la especie en sus primeras etapas.

De igual forma, las investigaciones indican que al aumentar gradualmente las dosis de NPK se obtienen mejores resultados hasta alcanzar un punto óptimo, después de esto el

efecto puede disminuir o incluso ser negativo por desbalances nutricionales. En este sentido *E. grandis* responde especialmente bien en suelos con baja disponibilidad de fósforo y potasio, mostrando mejoras claras en su crecimiento cuando las dosis se ajustan al sitio (García, 2023). Por ello, evaluar diferentes niveles de NPK permite definir una fertilización más eficiente, favoreciendo el crecimiento inicial y un manejo forestal sostenible.

### 1.8 Resultados de estudios recientes sobre fertilización de plantaciones

Según  han demostrado que la fertilización con NPK en plantaciones forestales tienen efecto positivo significativo sobre el crecimiento inicial y la acumulación de biomasa en diversas especies arbóreas. La aplicación de NPK favorece el crecimiento de las plantas forestales. Por ejemplo, se ha observado que el aporte combinado de estos nutrientes incrementa la biomasa aérea y mejora el crecimiento de las plántulas, evidenciando que una nutrición balanceada genera mejores resultados que la aplicación de nutrientes por separado, aunque la respuesta puede variar según la especie y las condiciones ambientales Quiñonez (2018). De igual manera, se señala que la fertilización de NPK contribuye aumentar a acumulacion de carbono en las plantaciones forestales, especialmente del género *Eucalyptus y Pinus* de esta manera destacan para mejorar la productividad y fortalecer los servicios ambientales que brindan estos sistemas

Según Quiñonez (2018) han demostrado que la fertilización con NPK en plantaciones forestales tiene efectos positivos significativos sobre el crecimiento inicial y la acumulación de biomasa en diversas especies forestales. En un estudio general sobre adición de nutrientes en plántulas, se observó que la aplicación combinada de NPK favorece el crecimiento de las plantaciones. Por ejemplo, se ha observado que el aporte combinado de estos nutrientes incrementan la biomasa aérea y mejora el crecimiento de las plántulas,evidenciando que una nutrición balanceada genera mayores resultados que la aplicación de nutrientes por separado,

aunque la respuesta varía según la especie y las condiciones ambientales. De igual manera, se señala que la fertilización de NPK contribuye aumentar la acumulacion de carbono en las plantaciones forestales, especialmente en el género *Eucalyptus y Pinus,* de esta manera destacan para mejorar la productividad y fortalecer los servicios ambientales que brindan estos sistemas (Melikov et al., 2023).

De la misma manera, se ha determinado que los efectos de la fertilización no dependen únicamente de la dosis aplicada sino también del momento y la forma en que se realiza la aplicación, en ese sentido, se puede decir que las plantaciones de acacia evidenciaron que ajustar la fertilización el crecimiento de las raíces finas favorece mayores incrementos en la altura diámetro y biomasa en comparación con los métodos convencionales (Quiñonez, 2018). Los resultados resultan el nivel de importancia de implementar estrategias y adaptadas a las necesidades de cada especie.

### *1.8.1 Crecimiento y desarrollo de E. grandis.*

El crecimiento de E.grandis se destaca por ser rápido especialmente en altura y diámetro durante sus primeras etapas lo que explica su amplio uso en plantaciones comerciales, este desempeño se debe a su eficiente fisiológica, su capacidad de adaptarse a diferentes condiciones y a un sistema radicular fuerte que le permite absorber mejor los nutrientes y formar biomasa aérea (García, 2023).

Además, el crecimiento de *E. grandis* depende de varios factores entre los que destacan la disponibilidad de nutrientes, sistema hídrico y prácticas silviculturales. Graciano y Goya, 2019) Durante los primeros meses de desarrollo, esta especie presenta altos requerimientos nutricionales, por lo que una fertilización adecuada favorece el desarrollo del follaje, el crecimiento del tallo y la consolidación del sistema radicular aspectos esenciales

para su crecimiento y desarrollo inicial (Graciano y Goya, 2019). En este sentido, comprender el patrón de crecimiento y desarrollo de *E. grandis* resulta fundamental para interpretar la respuesta de la especie a la fertilización con NPK y optimizar su manejo en plantaciones establecidas en condiciones edáficas similares a las del área de estudio.

### 1.9 Variables morfológicas: diámetro, altura, diámetro de copa

Las variables morfológicas, como la altura, el diámetro del tallo y el diámetro de copa, constituyen indicadores fundamentales para evaluar el crecimiento y desarrollo de *E.grandis* en plantaciones forestales. La altura muestra la capacidad del árbol para competir por la luz y su vigor general, el diámetro del tallo se relaciona con la acumulación de biomasa y su estabilidad, mientras que el diámetro de la copa refleja la expansión de las hojas y el aprovechamiento de la luz, por lo cual estos aspectos son fundamentales para la productividad del rodal (León, 2022).

De igual forma, estas actividades dependen tanto del ambiente como del manejo aplicado especialmente de la disponibilidad de nutrientes en el suelo. En las primeras etapas una buena fertilización favorece el aumento en altura y diámetro, mientras que una copa más desarrollada mejora la capacidad fotosintética (León, 2022). Por ello analizar estas variables en conjunto permite entender cómo responde el *E. grandis* a las distintas dosis de fertilización y orientar un manejo más eficiente en condiciones de suelo específicas.

El comportamiento morfométrico de las especies forestales bajo intervención silvicultural, como la elongación del tallo y la eficiencia fisiológica del árbol. Estudios sobre índices de sitio y factor de forma en diversas especies forestales dentro del Ecuador han demostrado que la acumulacion volumetrica y las respuestas dasometricas tempranas determinan la futura calidad de la troza comercial (Carvajal Benavides et al., 2023; Carvajal-

benavides et al., 2026). Por lo tanto, el manejo intensivo mediante fertilización con NPK durante el crecimiento inicial se vuelve crítico para asegurar que los fustes alcancen características anatómicas y estructurales de alto valor industrial (Benavides et al., 2023).

### 1.10 Variables de área foliar, área foliar específica y análisis foliar

Las variables que se relacionan con la biomasa aérea, como área foliar, área foliar específica, y análisis foliar, son indicadores para evaluar el estado nutricional y el desarrollo de *E. grandis.* El área foliar permite conocer la capacidad de la planta para captar luz y realizar la fotosíntesis, mientras que el área foliar específica se relaciona con el tamaño de la hoja y el peso seco, aportando información sobre la eficiencia del uso de los recursos y la capacidad de adaptación de la especie a diferentes condiciones ambientales. Por su parte el análisis foliar, permite determinar el contenido de nutrientes presentes en los tejidos vegetales y conocer el estado nutricional de la planta Nouvellon et al. (2010). Por su parte, el análisis foliar permite determinar el estado nutricional de la planta mediante la cuantificación de macro y micronutrientes presentes en los tejidos (González y Duff, 2023).

Asimismo, estas variables responden de manera sensible a la disponibilidad de nutrientes en el suelo y a las prácticas de fertilización aplicadas durante las etapas iniciales de crecimiento. Una nutrición adecuada favorece el desarrollo de las hojas, mejora la fotosíntesis y permite una mejor distribución de nutrientes dentro de la planta, lo que se refleja en un mayor crecimiento de la biomasa aérea (González y Duff, 2023). En este sentido, analizar el área foliar específica y la composición nutricional del follaje permite comprender de forma más completa como responde el *E.grandis* a la fertilización y evaluar sus defectos en el crecimiento inicial.

# CAPÍTULO II
# MATERIALES Y MÉTODOS

## 2.1 Tipo de investigación

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo, recopilando y analizando datos numéricos que describieron, predijeron y explicaron los resultados obtenidos. Su alcance fue aplicativo, sustentado en componentes teóricos y metodológicos que garantizaron la validez, relevancia y utilidad de los hallazgos. El nivel explicativo permitió identificar los efectos de la fertilización con NPK en el crecimiento inicial de *E. grandis,* estableciendo relaciones causales entre variables mediante un diseño experimental y técnicas estadísticas que facilitaron el análisis de los datos recolectados y la contrastación de las hipótesis formuladas. El estudio tuvo un diseño sincrónico o transversal, al analizar fenómenos ocurridos en un periodo de cuatro meses. Además, fue una investigación de campo, ya que los datos primarios se obtuvieron directamente del sitio experimental mediante la medición, observación y muestreo en condiciones naturales (Cortés, 2024).

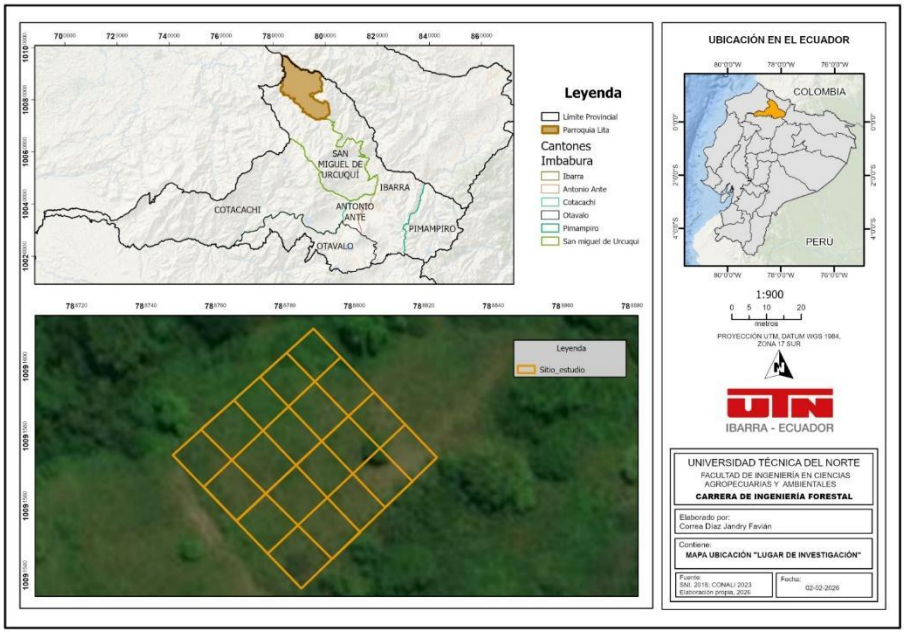
## 2.2 Ubicación del lugar y caracterización biofísica

El ensayo para la obtención de datos primarios se llevó a cabo en la finca de la Fundación Cristo de la Calle, ubicada en comunidad Cachaco, parroquia Lita, situada al noroccidente de la provincia de Imbabura, a 90 km de la ciudad de Ibarra. Según GAD Parroquial de Lita (2024), la comunidad Cachaco se encuentra ubicada en la parroquia rural de Lita, perteneciente al cantón San Miguel de Ibarra, y se ubica en la provincia de Imbabura.

### *2.2.1 Geografía del sitio investigación*

**Figura 1**

*Mapa de Ubicación del área de estudio.*




### *2.2.2 Límites*

Cachaco forma parte de las comunidades de la parroquia rural de Lita. Por consiguiente, la información con respecto a los límites se tomó como referencia de la parroquia Lita. Los limites como lo indican en el PDYOT de la parroquia Lita (2024) son los siguientes:

- Norte: limita naturalmente con el Río Mira, las parroquias de Jacinto Jijón y Caamaño pertenecientes al cantón Mira, y la parroquia Tobar Donoso que pertenece al cantón Tulcán, provincia del Carchi.
- Sur: limita con la parroquia La Merced de Bueno Aires, perteneciente al Cantón Urcuquí.
- Este: limita con la parroquia La Carolina, Cantón Ibarra

- Oeste: limita naturalmente con el Rio Lita, parroquia Alto Tambo, perteneciente al cantón San Lorenzo, provincia de Esmeraldas.

### *2.2.3 Caracterización edafoclimática del lugar*

El uso de suelos de la parroquia de Lita se divide en arboricultura, bosques, cultivos de ciclo corto, pastos y vegetación arbustivas. En cuanto a la tabla de taxonomía de los suelos se clasifican en tres órdenes (Prefectura de Imbabura, 2020):

- **Inceptisol:** corresponden a suelos con un desarrollo ped ontogenético moderado, caracterizados por su coloración que varía de pardo oscuro a pardo rojizo y una textura franca a franco – arcilloso. Presenta un pH levemente ácido a neutro, con valores comprendidos entre de 5,5 a 7,0 y una fertilidad de media a alta, lo que permite diversas actividades agrícolas y forestales. Estos suelos suelen ser superficiales a moderadamente profundos, desarrollados sobre una topografía que oscila de plana a moderadamente quebrada.
- **Molisoles:** Los suelos de orden Molisoles se distinguen por su coloración oscura, atribuida a su elevado contenido de materia orgánica (humus), y por su textura franco a franco – arcillosa, la cual facilita el crecimiento radicular de las plantas. Presenta un pH neutro a ligeramente alcalino, lo que favorece la disponibilidad de nutrientes esenciales. Este tipo de suelos poseen una fertilidad muy alta, destacándose por su contenido significativo de calcio, magnesio, potasio, y una capacidad de retención de agua moderada a alta, que contribuye a mantener la humedad adecuada para los cultivos.

### *2.2.4 Clima*

Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Imbabura (2023) en Lita en la comunidad de Cachaco presenta un clima tropical mega térmico húmedo, clasificado por la tipología de Pourrut. La temperatura promedio anual oscila entre 18 a 22° C, mientras

que la precipitación anual varía entre 3000 a 3400 mm. El régimen pluviométrico para esta zona se caracteriza por una distribución bimodal con dos picos de precipitación: uno en los meses de marzo a mayo y otro de octubre a diciembre.

## 2.3. Materiales, equipos y software

Los materiales de campo, materiales de laboratorio, equipos y software que se emplearon en el desarrollo de la investigación están descritos en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Materiales, equipos y software a emplear en la investigación.*

| Materiales de campo | Equipos | Software |
|---|---|---|
| Tierra de sitio<br>Fundas de papel<br>Libro de campo<br>Machete<br>Pala<br>Bomba de mochila<br>Sarán<br>Herramientas de vivero<br>Regadera | Cámara fotografía<br>GPS<br>Computadora<br>Podadora aérea<br>Balanza | ArcGIS PRO– Número de autorización: EFL209674136 – Licencia de educación: Teaching Lab Park – Geomática UTN – Autorizado por: Esri<br>Microsoft Word<br>Microsoft Excel<br>Microsoft Power Point |

## 2.4. Métodos, Técnicas e Instrumentos de Investigación.

### *2.4.1. Diseño Experimental y Tratamientos*

El experimento se realizó en un sitio con ligera pendiente y variación en la fertilidad del suelo. Debido a estas condiciones, se empleó un diseño de bloques completamente al azar (DBCA) con el propósito de reducir la variabilidad ambiental dentro del área experimental y asegurando que las diferencias observadas entre los tratamientos se debieran principalmente al efecto del fertilizante y no a factores externo, como heterogeneidad de suelos, pendiente o drenaje. Los tratamientos corresponden a diferentes dosis de fertilización, determinados con base a los resultados de análisis de suelo realizados en la zona de estudio, el cual indicó niveles

intermedios de nitrógeno, y concentraciones bajas de fósforo y potasio. En función de estos resultados, se recomendó la aplicación de 20 kg/ha de nitrógeno (N), 60 kg/ha pentóxido de fósforo ($P_2O_5$) y 20 kg/ha de óxido de potasio ($K_2O$).

Los factores de estudio corresponden a las dosis de fertilizante, aplicada en cuatro niveles: T1 = dosis recomendada (180 g/planta), T2 = dosis recomendada menos 20% (144 g/planta), T3 = dosis recomendada más 20% (216 g/planta) y T4 = testigo sin fertilización. El fertilizante empleado en la presente investigación se aplicó conforme a las recomendaciones establecidas por la Prefectura de Imbabura (2020), contenidas en el plan de Forestación y Reforestación de la provincia, el cual sugiere que, para los suelos ácidos de la parroquia Lita, es necesaria la aplicación un fertilizante completo (NPK) junto con roca fosfórica en el hoyo antes de la plantación.

La fase de campo se estableció bajo un diseño de cinco bloques y cuatro réplicas, considerando las características del terreno. Los bosques fueron asignados aleatoriamente garantizando que cada tratamiento se evaluará una vez por bloque. Las subparcelas contaron con un tamaño de muestra de 20 individuos, distribuidos en un marco real de 3 x 3 m. Los datos del presente estudio fueron analizados con un modelo estadístico que corresponde a un diseño de bloques al azar. El modelo general se expresa en la siguiente ecuación (Ec 1).

$$Yij = \mu + \tau i + \beta j + \varepsilon ij$$

**Fuente:** Aguirre y Vizcaíno, (2010)

**Donde:**

$Y_{ij}$ = Representa la variable respuesta observada.

**μ** = Media poblacional general.

$\tau_{ij}$ = Detalla el efecto fijo atribuible al i-ésimo nivel de fertilización.

$\beta_j$ = Cuantifica el efecto del j-ésimo bloque de control ambiental.

$\varepsilon_{ij}$ = Encapsula el error experimental o residual.

Las características generales del ensayo se presentan en la Tabla 2, la cual detalla los parámetros definidos para la aplicación del experimento.

**Tabla 2**

*Descripción y valores definidos en el ensayo.*

| Descripción | Valores |
|---|---|
| Número de tratamientos | 4 |
| Número de plantas por tratamiento | 20 |
| Número de bloques | 5 |
| Número de unidades experimentales | 20 |
| Número de plantas totales | 400 |

### *2.4.2. Protocolo de Aplicación Nutricional (Fertilización).*

*a) Recomendación de fertilización*

La fertilización inicial se realizó en función de los resultados obtenidos del análisis químico de suelo y las recomendaciones emitidas por el laboratorio LABORNOT, como se indica en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Recomendación del laboratorio Labornort con base al análisis de suelo para la corrección nutricional en el establecimiento de plantación de E.grandis.*

| Recomendación kg/ha | Elemento | Fertilizante (Fuente %) | Cantidad kg/ha | Dosis gr/planta | Concentración gr/planta |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | N | | | | 18 |
| 60 | $P_2O_5$ | 10-30-10 | 200 | 180 | 54 |
| 20 | $K_2$ O | | | | 18 |

Dicho análisis evidenció que los suelos de la comunidad de Cachaco, en la finca de la Fundación Cristo de la Calle, donde se estableció la plantación, presentan bajos niveles de fósforo (2,19 ppm) y potasio (0,15 meq/100ml), elementos esenciales para el desarrollo radicular y la formación de biomasa. Asimismo, el contenido de nitrógeno es de 42,50 ppm, mientras que el pH del suelo es fuertemente ácido (5), esta condición limita la disponibilidad

de nutrientes, lo cual, justifica la aplicación de enmiendas y una fertilización inicial correctiva para fortalecer el establecimiento y el desarrollo de *E. grandis.*

*b) Tipo de fertilizante*

La corrección nutricional del suelo se realizó mediante la aplicación de un fertilizante compuesto NPK 10-30-10, formulado con una alta proporción de fósforo 30%, seguido de nitrógeno 10% y potasio 10%. Este insumo de síntesis química se clasifica como un fertilizante mineral compuesto, ya que aporta tres macronutrientes esenciales para el desarrollo vegetal. Según (González et al., 2020), el nitrógeno es el eje medular del desarrollo foliar; el fósforo estimula el crecimiento radicular y la formación de tejidos estructurales; mientras que el potasio actúa como un agente crítico en la osmorregulación celular.

*c) Aplicación de fertilizante NPK*

La fertilización se programó para realizarse treinta días posterior al establecimiento de la plantación, considerando que, las plantas hayan desarrollado un sistema radicular funcional capaz de absorber los nutrientes aplicados. La dosificación del fertilizante se determinó mediante una balanza digital de precisión y su aplicación se efectuó según los tratamientos establecidos:

- T1= Dosis recomendada (180 gr/planta)
- T2= Dosis recomendada menos 20% (144 gr/planta)
- T3= Dosis recomendada más 20% (216 gr/planta)
- T4= Testigo (Sin fertilización)

La aplicación de fertilizantes se realizó cuando el suelo presentó humedad adecuada, coincidiendo con el inicio del periodo lluvioso, momento en que las raíces se encontraban activas y con mayor capacidad de absorción. El método empleado fue la aplicación en bandas

paralelas a curvas de nivel, técnica que favorece la eficiencia en el uso del fertilizante y reduce la pérdida de nutrientes por escorrentía o lixiviación.

Dado que el terreno destinado a la plantación presenta una ligera pendiente, se optó por realizar una sola faja en la parte superior de cada planta, con el objetivo de aprovechar el flujo natural de agua y asegurar una mejor disolución y absorción de nutrientes. La faja se ubicó a una distancia de 15 a 20 cm de la base y con una profundidad de 10 a 15 cm, empleando una barra metálica. En cada faja se colocó la cantidad correspondiente de fertilizante, cubriendo posteriormente con la misma tierra extraída durante la apertura, conforme a las recomendaciones metodológicas de (Chambi et al., 2023).

### *2.4.3. Instalación del experimento*

Las plantas empleadas en el estudio se originaron a partir de semillas obtenidas de plantaciones forestales del Campus Experimental "La Favorita". La identificación taxonómica de la especie se realizó mediante consulta y verificación en el Herbario Universidad Técnica del Norte (HUTN), lo que permitió confirmar que los individuos seleccionados corresponden a *E.grandis* Hill ex Maiden. Este proceso aseguró la correcta determinación de la especie antes de la recolección de semillas, garantizando la validez científica del material (Paredes et al., 2023).

#### *2.4.3.1. Preparación de sitio de plantación*

- Selección y delimitación del área de estudio.

El sitio seleccionado para la plantación se eligió debido a que presenta problemáticas como deforestación causada por la expansión de la frontera agrícola, pecuaria y acuícola, así como por la sobreexplotación de los recursos forestales. Se consideró que la zona de estudio presenta condiciones climáticas favorables para el establecimiento de un ensayo de adaptación y para la aplicación de fertilización química en el crecimiento inicial de *E.grandis*, sirviendo como base para el desarrollo de futuras reforestaciones productivas. El

área de estudio se delimitó mediante empleo de GPS, y los datos obtenidos se procesaron en el programa ArcGIS Pro dentro de la proyección UTM WGS84 zona 17 sur, determinando la superficie de plantación de 500 $m^2$.

#### *2.4.3.2. Muestreo de suelo*

La toma de muestras de suelo para evaluar su fertilidad se realizó siguiendo la metodología propuesta por Osorio (2012), considerando los criterios de representatividad y homogeneidad del terreno, previo a la extracción, se efectuó la limpieza de la superficie del suelo para eliminar residuos orgánicos Para la extracción se emplearon las siguientes herramientas: una pala para la limpieza superficial y la extracción de la submuestra del hoyo, una barra para la apertura del hoyo y un balde limpio para su transporte. La profundidad del muestreo se estableció hasta los 30 cm, correspondiente al horizonte superficial donde se encuentra la mayor actividad radicular y biológica. Para cada muestra se extrajeron 10 submuestras, distribuidas aleatoriamente en forma de zigzag a fin de obtener una muestra representativa del área.

Las submuestras se homogeneizaron para conformar dos muestras compuestas de aproximadamente 1 kg cada una, las cuales se empacaron en fundas plásticas limpias, se etiquetaron con la información correspondiente al sitio, fecha y finalmente se enviaron a laboratorio para los análisis correspondientes.

#### *2.4.3.3. Preparación del terreno*

La primera actividad por desarrollar fue la limpieza de la vegetación existente en el área destinada para el establecimiento del ensayo. Dicha limpieza se realizó considerando las características de vegetación presente en el terreno. En las zonas con vegetación leñosa se realizó el desbroce o tumba, utilizando herramientas como motosierra y machete. Asimismo, en el área desprovista de vegetación leñosa conformada principalmente por pastizal con altura

aproximada de 1,5 m, se llevó a cabo un rose o limpia de tipo mecánico mediante el uso de moto guadaña (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2023).

#### *2.4.3.4. Marcado y apertura de hoyos*

El marcado del terreno para la apertura de hoyos se realizó mediante el uso de una brújula, herramienta que permitió garantizar una distribución simétrica y ordenada de la plantación. La metodología empleada para el establecimiento del diseño de la plantación consistió en trazar una línea guía con un ángulo de 90 grados, a partir del cual se delinearon las líneas subsiguientes siguiendo el mismo patrón angular, asegurando uniformidad en la disposición espacial de las plantas.

La apertura de hoyos se realizó bajo el sistema de labranza conservacionista o labranza reducida, el cual promueve la mínima alteración del suelo, favoreciendo su estructura y conservación, de esta manera , este sistema se centra en la apertura del suelo (hoyado) para el establecimiento de las plántulas (Sadiq y Alasmari, 2024).

Durante el proceso de cavado, se aplicó la metodología propuesta por Osorio (2020) que recomienda separar la capa superficial fértil del horizonte inferior del suelo, con el fin de utilizar adecuadamente el material fértil durante el relleno. Se empleó el tipo de hoyado mejorado, con las medidas de 30 x 30 x 30 cm recomendado para suelos compactos o de baja fertilidad, con el propósito de facilitar el desarrollo radicular y mejorar la adaptación inicial de las plántulas.

#### *2.4.3.5. Establecimiento de la plantación*

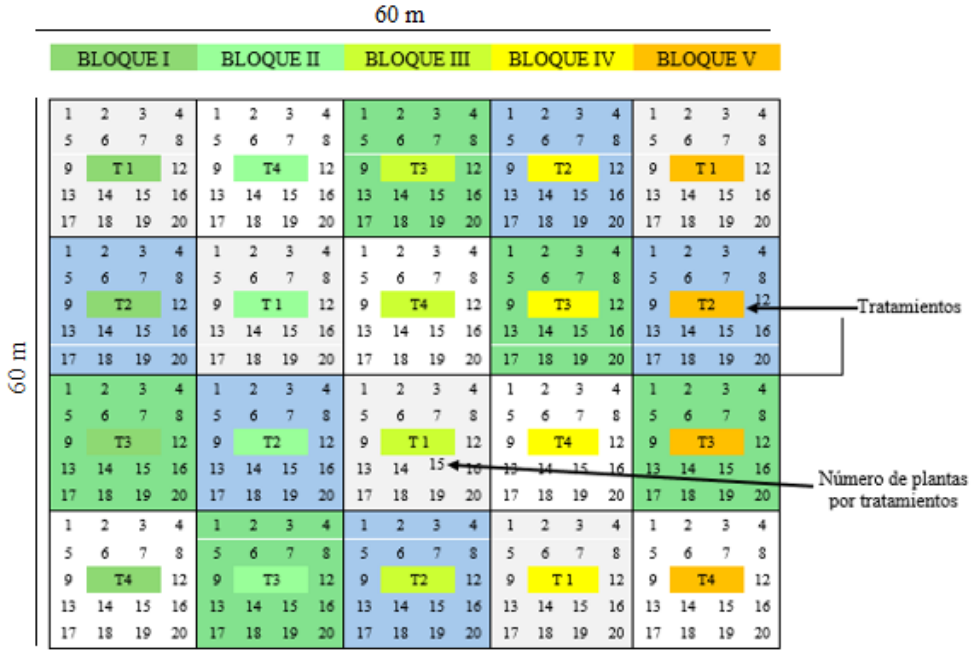
##### *a) Disposición en campo*

La distribución de las plantas en campo se efectuó siguiendo un diseño experimental de bloques completos al azar, establecidos en área total de 5000 $m^2$. Con el fin de minimizar

el efecto de borde y garantizar la representatividad de los tratamientos, se utilizó un área efectiva de 3600 $m^2$. La superficie se divide en cinco bloques de 60 x 12 m cada uno, los cuales se subdividieron en cuatro tratamientos de 15 x 12 m. pues cada tratamiento estuvo conformado por 20 unidades experimentales de 3 x 3 m, tal como se observa en la Figura 2.

**Figura 2**

***Distribución de unidades experimentales en cada bloque***




### *b) Selección de plántulas en vivero*

Se produjeron un total de mil plántulas, de las cuales se seleccionaron quinientas para el establecimiento del ensayo. Las plántulas seleccionadas en vivero se verificaron que cumplieran con los criterios de calidad propuestos por Machacuay (2020): tamaño uniforme de las plántulas, con una altura comprendida entre 20 a 30 cm; un buen desarrollo radicular, caracterizado por raíces abundantes y equilibradas en relación con la parte aérea; y estado fitosanitario óptimo. Se descartaron aquellas plantas que presentan malformaciones, deficiencias nutricionales, afectaciones por plagas o síntomas de enfermedades.

### *c) Transporte de plantas*

El transporte de las plántulas se clasificó en dos etapas: la primera etapa correspondió al traslado desde el vivero forestal de la Estación Experimental la Favorita hasta el vivero de la fundación Cristo de la Calle, y la segunda comprendió el traslado desde el último vivero hasta el sitio definitivo de plantación.

La primera etapa correspondió al traslado desde el vivero forestal de la Estación Experimental la Favorita hasta el vivero de la Fundación Cristo de la Calle, para minimizar el estrés hídrico durante el transporte, todas las plantas fueron regadas con abundante agua un día antes de su movilización. En el día del traslado, las plántulas se colocaron en gavetas rígidas asegurando una buena ventilación y evitando el aplastamiento de raíces y follaje y se fueron transportadas inicialmente en una carroza jalada por un caballo hasta el punto donde esperaba el camión, que posteriormente las trasladó al vivero de destino.

Una vez en el vivero receptor, las gavetas se descargan manualmente con cuidado y las plántulas se ubicaron bajo sombra parcial, iniciando inmediatamente el periodo de adaptación. Se estableció como tiempo de duración de dicho periodo de 45 días, basándose en prácticas de aclimatación, que permitió que las plantas restablecieron la función radicular, restablecieran el equilibrio fisiológico y redujeron el estrés causado por el transporte. Durante la aclimatación se realizó riego periódico de tres veces por semana, asegurando una humedad constante del sustrato, pero evitando el encharcamiento con la finalidad de prevenir problemas radiculares asociados al exceso de agua.

En los últimos 15 días antes del traslado al sitio definitivo de plantación, las plántulas expusieron gradualmente a condiciones de mayor irradiación solar: primero con sombra parcial y luego con luz solar directa con el propósito de preparar su fisiología para el ambiente en campo.

La segunda etapa, correspondiente a la movilización del material vegetal desde el vivero hacia el sitio definitivo de plantación, bajo estrictos protocolos de protección para evitar daños y reducir el estrés post - trasplante. Previo al traslado, las plántulas fueron sometidas a un riego, con la finalidad de mantener hidratado el sistema radicular. El transporte terrestre se efectuó en un vehículo de carga ligera, colocando los ejemplares en gavetas plásticas que garanticen la estabilidad y protección de las plántulas durante el recorrido. Una vez en el sitio de plantación, las plantas fueron distribuidas cuidadosamente, colocándolas cada una junto al hoyo correspondiente para facilitar el establecimiento inmediato en campo.

***d) Diseño y densidad de plantación***

La plantación se realizó bajo un marco real a 3 x 3 m, lo cual implica una densidad de 1111 árboles por hectárea, de acuerdo con la recomendación de la ficha técnica de Ecuador Forestal (2012).

## 2.5 Sistema de Variables e Indicadores

Las variables del presente estudio se definieron en función de los objetivos específicos planteados en la investigación. Para el cumplimiento del primer objetivo específico, las variables se clasificaron en biométricas y fisiológicas, orientadas a evaluar el crecimiento y desarrollo inicial de las plantas bajo diferentes tratamientos. Por otra parte, en relación al cumplimiento del segundo objetivo se centró en variables económicas y de análisis de costos, con el propósito de analizar la viabilidad económica del sistema evaluado.

### *2.5.1. Variables Biométricas y fisiológicas (Objetivo 1.- Determinar el efecto de la fertilización en el crecimiento inicial de la especie.)*

La obtención de los datos dasométricos se realizó a través de un censo de la población bajo estudio debido a que el tamaño de la muestra (N = 20 unidades experimentales), el cual permitió el registro completo de los individuos. Al evaluar la totalidad de la población los

datos obtenidos muestran la realidad exacta del grupo, sin necesidad de aplicación de fórmulas estadísticas.

#### *2.5.1.1. Evaluación de variables biométricas.*

*a) Altura total de la plántula (cm)*

La medición de altura total de las plantas se realizó siguiendo la metodología propuesta por Montero et al. (2021), mediante un método experimental de observación directa, midiendo manualmente la distancia vertical desde el cuello de la raíz hasta la yema apical de cada planta, con un flexómetro de precisión de ± 0,5 mm. Para mejorar la precisión de las mediciones se utilizó la técnica propuesta por Cuasquer (2017), la cual consiste en colocar una estaca junto al tallo de la plántula marcada en la base para servir como referencia. Las mediciones se realizaron cada mes durante los primeros cuatro meses después de la fertilización lo que permitió dar seguimiento al crecimiento inicial de las plantas.

*b) Diámetro a la altura del cuello (cm)*

La obtención de datos primarios para la variable diámetro a la altura del cuello se realizó mediante un método experimental de observación directa, siguiendo la metodología descrita por Escobar (2017). Esta técnica consiste en medir manualmente el diámetro del tallo a una altura de dos centímetros por arriba de la zona donde este se une con el sistema radicular. En la toma de datos primarios se empleó un calibrador tipo pie de rey, con precisión de ± 0,025 mm. Las mediciones se realizaron de manera mensual durante los cuatro meses posteriores a la fertilización, con la finalidad de monitorear el crecimiento diametral de los individuos y obtener datos que permitan evaluar la respuesta de las plantas a la aplicación de fertilizantes en el crecimiento inicial.

*c) Diámetro de copa (cm)*

La estimación del diámetro de la copa se realizó durante el cuarto mes posterior a la aplicación del fertilizante, utilizando el método de medición directa. Para eso se empleó una cinta métrica, con precisión de ± 1,10 mm, y se midió la distancia desde un extremo de la copa al extremo opuesto en dos direcciones perpendiculares. Posteriormente, se calculó el promedio de ambas mediciones para obtener el valor final de diámetro de la copa, siguiendo la metodología propuesta por (Ugalde, 1981), tal como se indica en la ecuación 1.

$$Dc = \frac{D1+D2}{2} \qquad \text{Ec 1.}$$

Dónde:

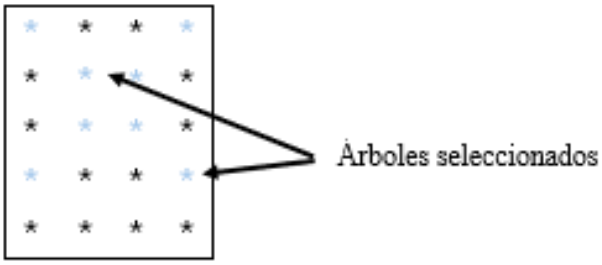
Dc= Diámetro de copa
D1= Diámetro uno
D2= Diámetro dos

***2.5.1.2. Evaluación de variables fisiológicas.***

La selección de árboles para la determinación de área foliar, área foliar específica y análisis foliar se realizó evitando las zonas de borde de las parcelas, ya que estas áreas pueden experimentar cambios drásticos en el desarrollo de los individuos debido a plagas, enfermedades o factores ambientales, lo que podría sesgar los resultados de los tratamientos. El ensayo se estructuró de 20 parcelas, con una conformada por 20 unidades experimentales. El muestreo se realizó siguiendo un patrón regular que garantiza la representatividad de la muestra, seleccionando un total de 160 árboles, distribuidos de manera que se eligieron ocho individuos por parcela. La selección se realizó siguiendo el patrón de muestreo en forma de X, tal como se ilustra en la Figura 2. La copa de cada árbol fue dividida en tres secciones y se recolectaron muestras dependiendo de la necesidad de la variable a estudiar (Machacuay y Llancari, 2020)

**Figura 3**

*Patrón de muestreo*




*a) Área foliar ($cm^2$)*

El área foliar se estimó mediante el método destructivo, aplicando un muestreo estratificado y sistemático, donde cada subparcela de 20 individuos constituye un estrato independiente. Dentro de cada subparcela, los árboles evaluados se seleccionaron siguiendo el patrón en forma de X. Dentro de cada subparcela se marcaron ocho árboles representativos, considerados como unidades experimentales, de las cuales se recolectaron nueve hojas completamente expandidas, distribuidas en los estratos superior, media e inferior de la copa. Dando un total de 72 hojas por subparcela evaluadas.

Las hojas recolectadas se colocaron en bolsas de papel, se etiquetaron en el sitio y fueron transportadas al laboratorio en un lapso de catorce horas. En el laboratorio, las hojas fueron colocadas en un sobre papel de fondo blanco, junto a una regla de 10 cm de longitud, que sirvió para calibrar la escala de las imágenes. Posteriormente, se capturaron las fotografías de las hojas montadas, siguiendo el procedimiento para el análisis de ImageJ (Guerra y Mosqueira, 2014).

El procedimiento de las imágenes se realizó de la siguiente manera: primero se configuró la escala utilizando el comando Analyze> Set Scale, ingresando la distancia conocida: 4 la unidad de longitud: cm, y activando Global scale. A continuación, las

imágenes se binarización mediante Process> Binary> Make binary. Cuando las hojas no aparecían negras sobre fondo blanco, se invirtió la imagen con Edit>invert**.**

Para la medición de área foliar, se seleccionó la región de la hoja utilizando la herramienta "Wand" y posteriormente se aplicó Analyze>Measure para obtener el valor del área.

*b) Área foliar específica ($cm^2$/gr)*

El área foliar específica corresponde a la relación entre el área de una hoja fresca dividida por el peso seco. Para su determinación, se utilizó el mismo muestreo para la estimación del área foliar y el cálculo para determinar el área foliar sirvió para la estimación del área foliar específica. Las hojas fueron trasladadas al laboratorio, donde se secaron en el horno a 75 °C durante 48 horas, según lo recomendado por González y Duff (2023) hasta alcanzar un peso constante. Finalmente, el valor de AFE utilizando la ecuación (Ec. 2), relacionando el área foliar medida previamente con ImageJ con el peso seco obtenido.

$$AFE=AF/PS \qquad \text{(Ec 2)}$$

Donde:

*AFE* = Área foliar específica
*AF* = Área foliar
*PS* = Peso seco

*c) Análisis foliar (g/kg)*

El análisis foliar se realizó mediante método destructivo, aplicado al cuarto mes posterior a la fertilización, siguiendo el protocolo establecido por el laboratorio LABORNORT. y del INIAP. Este procedimiento consistió en colectar de 200 gr de muestra fresca por parcela, distribuidas en las cuatro orientaciones cardinales (Norte – Sur, Este – Oeste) con el fin de obtener una muestra representativa. La selección de hojas se realizó bajo criterios definidos: hojas maduras recientes, correspondiente a la segunda o tercera hoja a

partir del ápice de la rama. Se evitó recolectar hojas terminales, envejecidas o con síntomas de enfermedades o deficiencia nutricional, así como aquellas procedentes de zonas bajas o sombreadas. Las muestras se colocaron en bolsas de papel debidamente identificadas según cada tratamiento y se trasladaron al laboratorio dentro de las 24 horas posteriores a su recolección. Allí se analizó la concentración de nitrógeno, fósforo y potasio y los resultados se compararon con los valores de referencias de la tabla 4 para evaluar el estado nutricional de las plantas en cada tratamiento.

***Tabla 4***

*Interpretación del análisis foliar de E.grandis de acuerdo con diferentes fuentes*

| Elemento | Rango adecuado g/kg | | | |
|---|---|---|---|---|
| Nitrógeno | 19,4 - 21,3 | 16 – 29 | 18 – 34 | 22 – 27 |
| Fósforo | 1 - 1,2 | 1 – 3 | 1 – 2,2 | 1,7 – 2.2 |
| Potasio | 8,5 - 10,6 | 6 – 18 | 9 – 18 | 8,5 – 9 |
| Calcio | 4,8 - 6,1 | 2 – 4 | 3 -6 | 7,1 – 11 |
| Magnesio | 1,9 - 2,4 | 1 – 3 | 1.1 – 2,1 | 2,5 – 2,8 |
| | De Lima et al. (2020) | Boardman et al. (1997) | Dell et al. (1995) | Silveira et al. (1991) |

### *2.5.2. Variables Económicas y de Análisis de costos (Objetivo 2.- Establecer los costos de establecimiento y manejo de la plantación.)*

La determinación del establecimiento de plantación se realizó mediante el método de observación directa a través de la metodología de Análisis de Costos por Actividad ABC planteada por Robert Kaplan y Robin Cooper 1998 y adaptada al campo forestal (Coronel, 2017) la cual se realizó una plantilla donde se agrupó y registró los datos de cada una de las actividades desarrolladas durante la plantación.

#### *2.5.2.1. Costos de establecimiento de plantación*

El procedimiento para determinar los costos de establecimiento de la plantación de *E.grandis* se creó una matriz de actividades, donde se registraron todas las actividades, desde la preparación del terreno hasta el manejo

*a) Costos de fertilización*

El establecimiento de los costos de fertilización está enfocado en la influencia de las diferentes dosis de fertilizante en las variables morfológicas del estudio. Para determinar los costos de fertilización se consideraron los costos de la fertilización los cuales contemplan costos directos e indirectos (Morocho, 2016).

Los costos directos son aquellos que están plenamente identificados en el proceso: herramientas, mano de obra y fertilizantes. Mientras que, los costos indirectos no están identificados con el proceso, como es el caso del flete, análisis de suelo, planeación de actividades.

*b) Costos de insumos*

El costo de los fertilizantes se calcula teniendo en cuenta el precio pagado por cada fuente al momento de la compra, en presentaciones de 50 kg. Adicionalmente, se debe considerar la dosis aplicada por planta, es decir gramos/planta y cantidad de plantas. Este procedimiento se realizará para cada tratamiento.

El costo del fertilizante se puede obtener dividiendo el precio por los kilogramos que pesa el bulto y se obtiene el precio $/gr/planta del fertilizante o con la ecuación 2.

$$Costo\ del\ fertilizante = \sum_{i=1}^{n} \quad \frac{\left(\frac{Cf\ \$}{Pf\ kg}\right)}{(1000gr)} * D\ gr/planta \qquad \text{Ec 2.}$$

Donde:

Cf $ = Costo del fertilizante
Pf kg = Peso del fertilizante
1000 gr= Equivalencia de 1 kg

D = dosis de fertilizante

*c) Costo mano de obra*

La estimación del costo de mano de obra depende del tiempo que tardan los trabajadores en realizar la corona y la colocación del fertilizante y el costo del diario se basa en el salario del sector, por cada ocho horas trabajadas pagan el valor de 15 dólares americanos. Para establecer los costos de mano de obra por tratamiento se contabilizó el tiempo (horas trabajadas) en que se tarda en fertilizar cada tratamiento y se multiplicará por la fracción de un día laborable, es decir, los 15 dólares se dividirán para las ocho horas trabajadas y sale el valor por hora trabajada.

**2.6. Procedimiento Estadístico y Procesamiento de Datos.**

El análisis estadístico inició con la validación de la normalidad de los datos que se verificó mediante la prueba de Shapiro – Wilk, mientras que la homocedasticidad de varianza se evaluó con la prueba de Levene. En la variable Área Foliar Específica (AFE) debido a la naturaleza de los datos se intentó estabilizar la varianza mediante transformaciones matemáticas de logaritmo y de raíz cuadrada; sin embargo, al persistir la ausencia de normalidad, se optó con la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis.

Las variables que cumplieron los supuestos paramétricos fueron sometidas a un Análisis de Varianza (ANOVA). En los casos con diferencias significativas en las variables dasométricas y análisis foliar, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p <$ 0,05), el cual permitió identificar la dosis óptima, mientras que para las variables no significancia como el área foliar se realizó la descripción de tendencias.

# CAPÍTULO III
# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 3.1 Resultados para el objetivo 1: Determinar el efecto de la fertilización en el crecimiento inicial de la especie.

### *3.1.1 Resultados biométricos*

Previamente al análisis inferencial, se verificaron los supuestos del modelo estadístico mediante la evaluación de la normalidad utilizando la prueba de Shapiro – Wilk y la homocedasticidad con la prueba de Levene. El análisis de varianza (ANOVA) mostró efectos altamente significativos en los tratamientos ($p < 0,0001$) sobre el incremento en altura total, diámetro a la altura del cuello y el diámetro de copa, valores claramente inferiores al nivel de significancia establecido ($p = 0,05$). En consecuencia, se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alterna, confirmando la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para todas las variables dasométricas evaluadas.

El coeficiente de variación (CV), oscila entre 4,43 % para incremento diámetro de copa, 12,94 % para incremento diámetro a la altura del cuello y 16,90% incremento en altura total, lo que indica un nivel de variabilidad de bajo a moderado, lo cual respalda la confiabilidad de los datos obtenidos y la consistencia del diseño experimental.

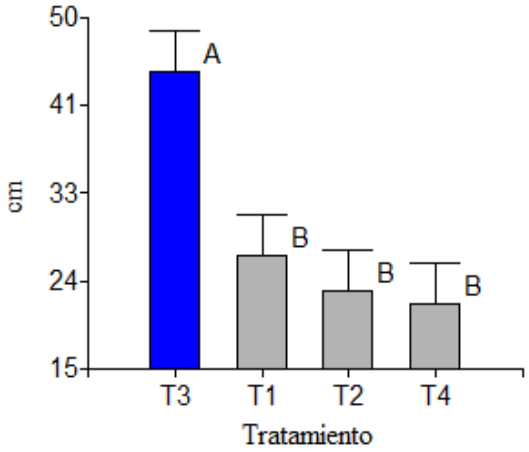
### *3.1.2 Incremento en altura total de la planta (cm).*

Los tratamientos fertilizados con NPK (10-30-10) mostraron respuestas diferenciales en el incremento en altura durante los cuatro primeros meses posterior a la aplicación del fertilizante. En función de estas diferencias, se realizó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey, con la finalidad de identificar el tratamiento con mayor respuesta de crecimiento. Los resultados indicaron que el tratamiento al que se le aplicó mayor dosis de fertilizante T3 (216 g/planta), presentó un incremento progresivo y significativamente superior al cuarto mes de evaluación, alcanzando una ganancia de 45% con respecto al valor inicial. En contraste, el tratamiento testigo registró un incremento del 20%, evidenciando una respuesta marcadamente menor del

25% en comparación con el mejor tratamiento. Las diferencias se observan claramente en la figura 4, confirmando el efecto positivo de la fertilización con NPK sobre el incremento en altura.

**Figura 4**

*Comportamiento del incremento de la altura total de E. grandis según los niveles de fertilización.*




Nota: Los valores muestran el promedio del incremento en altura (cm). Las letras distintas indican diferencias significativas según Tukey $p < 0,05$. Tratamientos: T1 (180 gr), T2 (144 gr), T3 (216 gr) y T4 (Control).

Los resultados sugieren que, dentro de los rangos evaluados, existe una relación dosis-respuesta en la cual mayores aportes de NPK se traduce en mayor elongación del tallo. Desde la fisiología vegetal, el nitrógeno (N) actúa como componente estructural de proteínas y enzimas responsable de la división celular en meristemas apicales, mientras que fósforo (P) estimula la generación de ATP para procesos de elongación y el potasio (K) regula la turgencia celular y el transporte de fotoasimilados a través del floema. Esta combinación favorece una mayor actividad mitótica en el ápice del crecimiento y el incremento en la tasa fotosintética, esto se traduce en mayor crecimiento y desarrollo estructural de las plantas (Alvarado y Raigosa, 2012).

De igual forma, la interacción del nitrógeno (N) y magnesio (Mg) resulta decisiva para la capacidad fotosintética. Estos dos elementos forman parte de la molécula de clorofila, la cual es responsable de la captación de energía solar y el mantenimiento de los tejidos fotosintéticos activos. El magnesio, como átomo central de la clorofila y el nitrógeno como componente fundamental de las proteínas del aparato fotosintético, actúan sinérgicamente para incrementar la eficiencia en la fijación de carbono, por ende, la relación biomasa/raíces, favoreciendo la formación de tallos, ramas y hoja en las primeras fases del establecimiento (Rodríguez y Álvarez, 2020).

La explicación del incremento también se puede atribuir a la función del sistema radicular, en un estudio realizado por Bordron et al. (2019) sobre *E. grandis,* se evidencio que la fertilización mejora la absorción de nutrientes por las raíces finas especialmente en mayores profundidades donde estas presentan mejor capacidad del transporte. La condición favorece la movilización de elementos como potasio y calcio, importantes para la estructura y el crecimiento celular, asegurando un buen suministro de nutrientes en etapas iniciales. Por lo tanto, las dosis insuficientes limitan la expansión del sistema radicular y la capacidad de exploración del suelo.

En ese contexto, los incremento en altura observados en el presente estudio evidencian que a mayor aporte de NPK se obtiene un mejor desempeño en crecimiento en altura. Por lo cual, la respuesta a la fertilización temprana determina la productividad a largo plazo. De igual forma, Cabrera (2024) reportó incrementos de hasta 65% en altura a los seis meses, cuando se aplicó fertilización al momento de la plantación y una re fertilización a los tres meses, utilizando formulaciones 06 – 30 – 06 + micronutrientes y 10 – 00 – 10). De igual forma, otro estudio realizado por Laclau et al. (2016) reportó que a los tres años después de la plantación, los tratamientos al que se les aplicó fertilización con potasio (K) presentaron un incremento neto 28 % en promedio cada 6 meses.

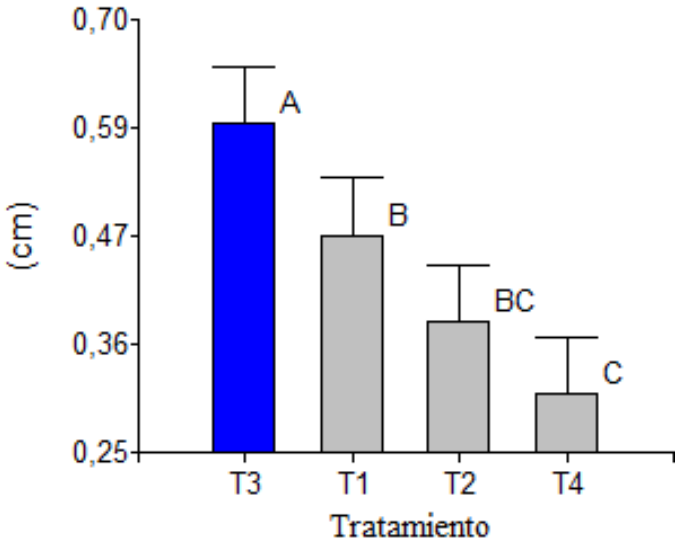
En relación a las variables biométricas, los datos concluyen que el tratamiento con dosificación superior de NPK (T3 216 gr/planta) arrojó un desempeño biológico sobresaliente, materializado en un incremento neto de 25 % en altura total en comparación con el tratamiento control

### *3.1.3 Incremento en diámetro a la altura del cuello (cm).*

Los resultados obtenidos evidenciaron una estímulo estadísticamente significativo en diámetro a la altura del cuello (DAC) como respuesta a la aplicación de fertilizante NPK. Posterior al análisis de varianza, se aplicó una prueba de rangos múltiples de Tukey para identificar los tratamientos con mayor impacto en el desarrollo. En este contexto el tratamiento T3 que es de 216 gr por planta destacó por su mejor desempeño con el 55%. En contraste, el tratamiento testigo (T4), sin aplicación de fertilizante, registró un incremento significativamente inferior, del 26 %, tal como se observa en la Figura 5.

**Figura 5**

*Respuesta del incremento del diámetro a la altura del cuello en E.grandis según el nivel de fertilización.*




Nota: Los muestran un incremento promedio del diámetro a la altura del cuello (DAC) expresados en (cm). Las letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas según la prueba de rangos múltiples Tukey < 0,05. Tratamientos: T1 (180 gr), T2 (144 gr), T3 (216 gr) y T4 (Testigo).

Fisiológicamente, la dinámica de división y diferenciación cambial está altamente dependiendo del estado nutricional de la planta, el cual provee la energía y los precursores metabólicos necesarios para la biogénesis del xilema y el floema secundario, determinando finalmente la acumulación de biomasa leñosa (Morocho, 2016).

Los hallazgos encontrados en el incremento en diámetro de cuello, determinó que el tratamiento T3, ecofisiologicamente incremento de forma significativa la actividad cambial. Este desarrollo acelerado del DAC evidencia una consolidación estructural precoz de la planta a través de de la formación intensiva del xilema y floema secundario, este mecanismo biológico confiere a *E. grandis* la resistencia mecánica necesaria para soportar los embates del viento y mitigar el estrés hídrico post - trasplante en suelos con baja fertilidad.

La fertilización con potasio (K) ha sido vinculada de manera consistente con el incremento en la producción de madera del tallo. El potasio estimula la actividad del cambium vascular al promover las divisiones celulares periclinales, este efecto se fundamenta en su rol como principal osmoregulador celular, ya que mantiene el potencial de turgencia necesario para la división expansión de las células cambiales, favoreciendo el engrosamiento del tallo Chambi et al. (2023).

Los resultados obtenidos para esta variable de estudio guardan concordancia con la literatura técnica, confirmando que la fertilización con NPK ejerce una influencia positiva sobre el crecimiento del diámetro de cuello (DAC) en *E. grandis.* En ese sentido, Silva et al. (2019) reportan que la aplicación de 240 kg/ha de $K_2O$ generó un incremento del 27 % en grosor de tallo respecto al testigo cada seis meses de evaluación. Esta respuesta subraya la importancia de la suficiencia potásica para maximizar la robustez estructural de la planta durante su etapa de establecimiento.

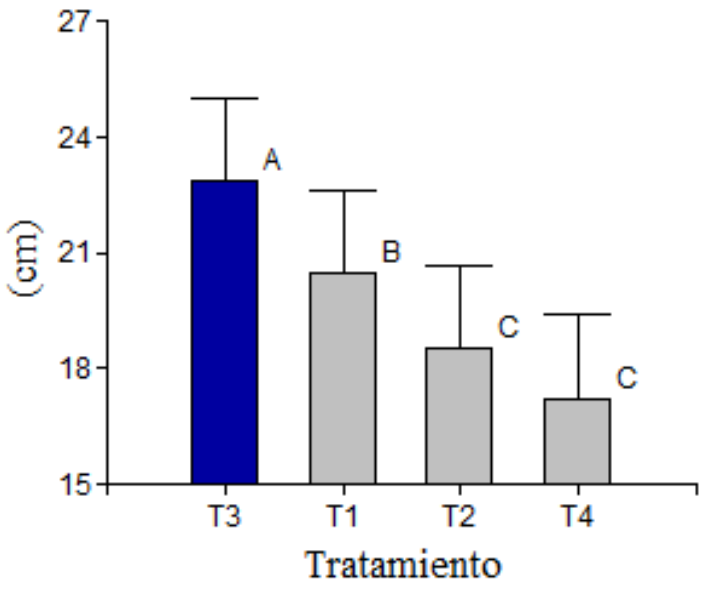
### *3.1.4 Incremento de diámetro de copa (cm).*

El diámetro de copa respondió de forma significativa a la fertilización con NPK evidenciando diferencias estadísticas según el ANOVA. Seguidamente se aplicó la pruebas de rangos múltiples Tukey ($\alpha = 0,05$) con el fin de identificar el tratamiento con mayor efectividad biológica. A lo largo de los cuatro meses de monitoreo en campo, se determinó que el crecimiento diametral es ascendente en la totalidad de los tratamientos.

La dosis con mayor cantidad de fertilizante T3 (216 gr/planta) mostró una superioridad biométrica, alcanzando un incremento del 43%, con una diferencia significativa respecto al tratamiento control (T4), el cual registró un desarrollo atenuado del 28 %. Los hallazgos confirman una correlación directa entre la dosis de fertilizante aplicada y el incremento del diámetro de copa, tendencia que se detalla en la figura 5.

**Figura 6**

*Efecto de la dosis de fertilización NPK sobre la expansión diametral de la copa en E.grandis.*




Nota: Los valores indicados representan el incremento promedio del diámetro de copa expresado en centímetros (cm). Las letras distintas sobre las barras indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de rangos múltiples de Tukey *p< 0,05.* Tratamientos: T1 (180 gr), T2 (144 gr), T3(216 gr) y T4 (control)

El crecimiento del diámetro en *E. grandis* está directamente relacionado con el tamaño de la copa y su capacidad fotosintética, En las primeras etapas un desarrollo vigoroso

suele asociarse con copas amplias, que permiten una mejor captación de luz y favorecen el crecimiento del tallo. En este proceso, la actividad del cambium responsable de formar madera y aumentar el grosor depende de las relación entre el área foliar y una adecuada nutrición.

Estudios respaldan que la suplementación mineral acelera significativamente la tasa de crecimiento Silva et al. (2019). Al evaluar clones de *E. grandis,* determinó que al aplicar 320 kg/ha de NPK (08 - 32 -16) optimizando el crecimiento al año posterior a la plantación. Asimismo, estudios realizados en Colombia por Grover et al. (2021) destacan la importancia de una nutrición balanceada  al evaluar la aplicación de NPKSB en distintas concentraciones, como resultado obtuvieron que los tratamientos con 200 y 400 kg/ha presentaron diferencias significativas, alcanzando un aumento del 11 % en diámetro frente al control cada seis meses. Estos estudios evidenciaron que Eucalyptus requiere niveles adecuados de fertilización para alcanzar el máximo desarrollo.

Finalmente, en relación a la evaluación de las variables dasométricas , los datos concluyen que el tratamiento con la dosificación superior de NPK  (T3: 216 gr/planta) arrojó un desempeño biológico sobresaliente, materializado en un incremento del 25 % en altura total, 15 % en diámetro de copa y un robusto 29 % en el Diámetro a la Altura del Cuello (DAC) en contraposición al crecimiento del grupo testigo.

## 3.2 Resultados fisiológicos  (Área foliar, área foliar específica y Análisis foliar).

### *3.2.1 Área foliar*

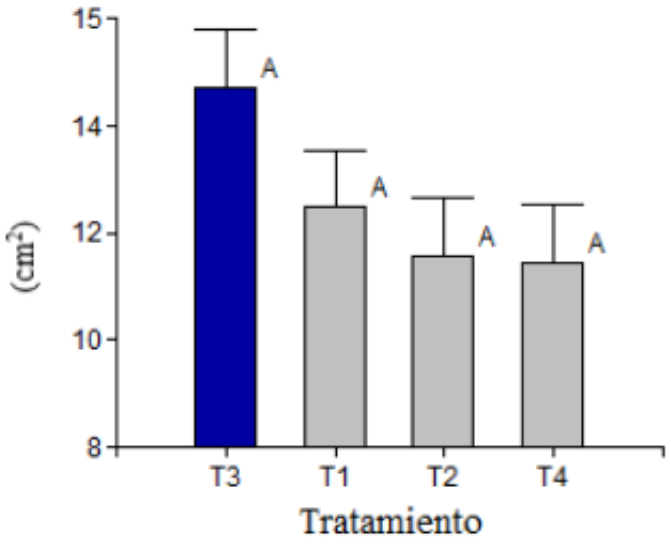
Previo al análisis inferencial, se validaron los supuestos de normalidad (Shapiro – Wilk) y homocedasticidad (Levene). Tras confirmar el cumplimiento de los supuestos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de la fertilización con NPK

sobre el área foliar de *E.grandis.* El ANOVA no mostró efectos significativos de los tratamientos ($p$ = 0,1972), valores claramente superiores al nivel de significancia establecido ($p$ = 0,05). En consecuencia, no se encontró evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula lo que indica que la fertilización no generó cambios significativos en el área foliar bajo las condiciones evaluadas. El coeficiente de variación del 18% refleja una variabilidad moderada y respalda la confiabilidad del diseño experimental.

Aunque no se evidenciaron diferencias estadísticas significativas, se observó que el desarrollo foliar tendió a mejorar conforme aumentaba la dosis de NPK en la etapa inicial. Al cuarto mes, el tratamiento al que se le aplicó mayor dosis de fertilizante T3 (216 gr/ planta) presentó un incremento del 27 % en el área foliar respecto al (T4), el cual representó un desempeño más bajo, comportamiento que se detalla en la Figura 7.

**Figura 7**

*Superficie foliar promedio del E.grandis bajo diferentes niveles de fertilización.*




Nota: Las barras representan el promedio del área foliar total expresado en centímetros cuadrados ($cm^2$). Letras iguales indican la ausencia de diferencias estadísticas significativas de acuerdo con la prueba de rangos múltiples Tukey $p < 0,05$. Tratamientos: T1 (180 gr), T2 (144 gr), T3 (216 gr) y T4 (Control).

La morfología de las hojas está asociado al nitrógeno, este cumple un papel importante en la síntesis de clorofila y proteínas estructurales y el fósforo en la regulación estomática y la expansión celular, procesos que en conjunto determinan la capacidad de expansión de la superficie fotosintética en etapas tempranas de establecimiento. El fósforo desempeña un papel fundamental en el funcionamiento del aparato fotosintético, ya que participa directamente en los procesos de transferencias y almacenamiento de energía, como la síntesis de ATP y NADPH, indispensable en las reacciones fotoquímicas y bioquímicas de la fotosíntesis (Soto y Ángulo, 2024). Un adecuado suministro de fósforo constituye el correcto funcionamiento de los cloroplastos, reduce el estrés oxidativo y favorece la estabilidad y concentración de los pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, mejorando la eficiencia fotosintética de la especie.

Las investigaciones recientes confirman que la fertilización con NPK ejerce efecto significativo y diferenciador sobre el área foliar, siendo el nitrógeno el nutriente más determinante para la expansión foliar, mientras que el fósforo y el potasio modulan su eficiencia funcional.

### *3.2.2 Área foliar específica.*

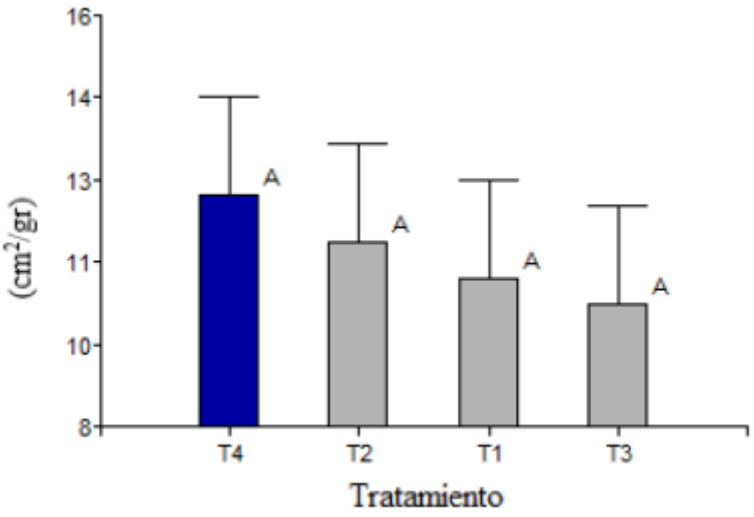
Previo al análisis inferencial, se validaron los supuestos de normalidad (Shapiro – Wilk) y homocedasticidad (Levene). Debido a que los datos de área foliar específica no cumplieron con el supuesto de normalidad (prueba de Shapiro – Wilk, $p < 0{,}0001$), se procedió a realizar transformaciones logarítmicas y de raíz cuadrada. Dado que ninguna de estas transformaciones logró estabilizar la varianza ni normalizar la distribución de los residuos, se optó por un enfoque no paramétrico.

Los efectos de los tratamientos se evaluaron mediante la prueba de Kruskal Wallis. Este análisis determinó la ausencia de diferencias significativas entre las dosis aplicadas, con un valor de probabilidad notablemente superior al nivel crítico ($p > 0{,}05$). Por lo tanto, se

aceptó la hipótesis nula, sugiriendo que , bajo las condiciones del estudio, las dosis aplicadas no alteraron el comportamiento del área foliar específica (ver figura 8).

**Figura 8**

*Comportamiento del área foliar específica en E. grandis*




Nota: Las barras representan el Área Foliar Específica (AFE) para cada tratamiento. La presencia de letras similares sobre las barras y el valor de probabilidad obtenido mediante la prueba de Kruskal-Wallis ($p > 0,05$) indican ausencia de diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos. Tratamientos: T1 (180 g), T2 (144 g), T3 (216 g) y T4 (Control).

Los valores del área foliar específica (AFE) evidencian un acoplamiento funcional estrecho entre el contenido de nitrógeno foliar y la capacidad fotosintética. Este patrón se sugiere que la productividad fotosintética potencial está fuertemente determinada por la cantidad nitrógeno expresada por unidad de área foliar (Grover, et al., 2021)

### *3.2.3 Análisis foliar*

Inicialmente se validaron los supuestos de normalidad (Shapiro – Wilk) y homocedasticidad (Levene). Para determinar el efecto de la fertilización con NPK sobre las concentraciones foliares se aplicó un análisis de varianza (ANOVA). El ANOVA mostró efectos altamente significativos de los tratamientos en las concentraciones de nitrógeno ($p$ = 0,0009) , potasio ($p$ = 0,0037) y calcio ($p$ =0,0019). Los resultados permitieron rechazar la

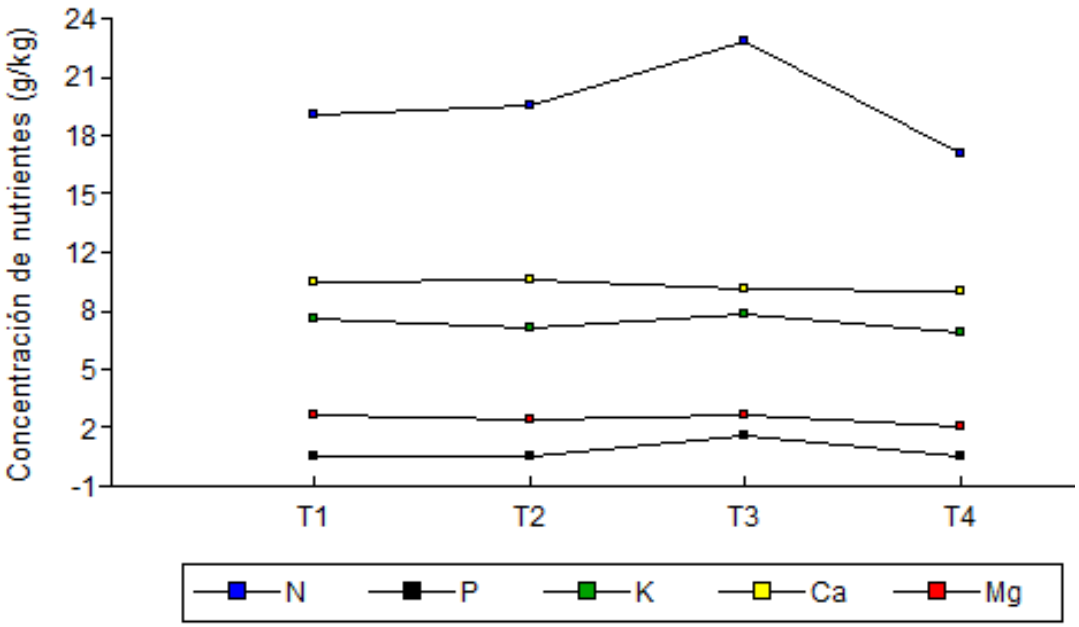
hipótesis nula, confirmando que la fertilización influyó directamente en la absorción de dichos elementos. Por el contrario, para el magnesio (Mg) y fósforo (P), los valores de p obtenidos (0,1395 y 0,2994) fueron superiores al nivel de significancia crítico ($\alpha = 0,05$). Por consiguiente, no se halló evidencia estadística suficiente para afirmar que las dosis aplicadas alteraron las concentraciones de estos últimos elementos bajo las condiciones del ensayo, por tanto se acepta la hipótesis nula.

El coeficiente de variación (CV) osciló entre 6,53 % y 18,39%. Este rango refleja un nivel de variabilidad, que transita de baja a moderado según los estándares de experimentación biológica, ratificando la precisión del diseño experimental y alta confiabilidad de los datos obtenidos recolectados.

Transcurrido los cuatro meses desde la aplicación de fertilizante, el análisis foliar reveló variaciones significativas en la acumulación de nutrientes según el tratamiento. Los valores específicos y las comparaciones estadísticas correspondientes se presentan en la figura 9**.**

**Figura 9**

*Comportamiento de los niveles de fertilización en el análisis foliar.*




*Nota:* Las líneas representan la concentración de macronutrientes expresada en (g/kg MS). De acuerdo con la prueba de rangos múltiples de Tukey $p < 0,05$, se observaron diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de N, K y Ca; mientras que para P y Mg, la respuesta no fue significativa $p > 0,05$. Tratamientos: T1 (180 gr), T2 (144 gr), T3 (216 gr) y T4 (Control).

El incremento indica una mayor asimilación de esqueletos carbonados para la síntesis de novo de proteínas estructurales y complejos enzimáticos fundamentales para la expansión del aparato fotosintético y la cinética de los meristemas apicales y cambiales. Los hallazgos del presente estudio concuerdan con lo reportado por Silva et al. (2020), quienes mencionan que a mayor disponibilidad de nitrógeno potencia el rendimiento de materia seca y la eficiencia cuántica de la fotosíntesis en estadios iniciales de *E. grandis.*

El tratamiento T3 exhibió la máxima concentración de fósforo foliar, registrando un valor de 1,698 g/kg. Sin embargo, la alta dispersión intrapoblacional impide que esta diferencia matemática alcance significancia estadística bajo las condiciones del ensayo. Las concentraciones óptimas de fósforo mejoran notablemente las concentraciones de nutrientes en las hojas como el potasio y magnesio Torres et al., (2025). Lo cual explica el mejor desempeño fisiológico asociado a T3 y coincide con lo encontrado por Furtado y Barros

(2019), quienes demostraron que el aumento de P mejora la exploración radical y la eficiencia de absorción de otros macronutrientes en *E. grandis.*

El potasio (K) mostró valores cercanos al rango óptimo únicamente en T3 (8,142 g/kg). Mientras que los demás tratamientos evidenciaron deficiencia. Debido a que el K participa en la regulación estomática, el balance hídrico y la translocación de carbohidratos, esta condición sugiere que T3 promovió una mayor eficiencia en el uso del agua y transporte interno de fotosintatos, lo cual se refleja en una mejor capacidad de crecimiento. Estudios recientes de Santos y Barros (2021) evidencian que las concentraciones optimas de K aumentan la tasa de asimilación fotosintética neta en híbridos de *E. grandis,* lo cual respalda los resultados obtenidos en el estudio.

Por otra parte, las concentraciones de Ca y Mg manifestaron rangos de suficiencia elevados T1, T2 y T3, aunque dentro de rangos que no comprometen la homeostasis celular. El Ca contribuye a la integridad mecánica y rigidez de la pared celular lábil , mientras que el Mg, componente central de la molécula de clorofila, favorece una mayor intercepción y absorción de la radiación fotosintética activa (RFA). Los altos niveles de nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio encontrados en el tratamiento T3 generan un ambiente nutricional que maximiza la actividad fotosintética, la elongación celular y la formación de tejidos conductores, lo cual demuestra la superioridad fisiológica y estructural con respecto a los otros tratamientos.

### 3.3 Resultados para el objetivo 2: Establecer los costos de establecimiento y manejo de la plantación.

Los costos de establecimiento y manejo temprano de plantaciones de *E. grandis* presenta una fase crítica de alta inversión de capital, cuya eficiencia condiciona la viabilidad económica y el rendimiento del proyecto a largo plazo.

En este estudio, el tratamiento con fertilización al que se aplicó dosis de 216 g/planta NPK (T3) requiere una inversión de 1796,67 USD/ha. En contraste, el tratamiento control (T4), registró una inversión 1596,67 USD/ha. Esta divergencia establece un incremento neto de 200 UDS/ha, equivalente a una expansión presupuestaria del 11,13 % en la fase de implantación, el cual se concentra en el incremento de la carga financiera del ciclo forestal, debido a la alta dependencia de insumos (tabla 6).

**Tabla 5.**

*Matriz de costos unitarios y proyectados para el establecimiento del año 1 de E.grandis*

| Rubro Operativo | Descripción Técnica | Costo Total (USD/0,6 ha) | Costo Total (USD/ha) | Participación Relativa (%) |
|---|---|---|---|---|
| Mano de obra | Preparación del terreno, señalamiento, hoyado, plantación, aplicación de fertilizantes y control inicial de plagas | $ 455,00 | $ 758,33 | 42,21 % |
| Insumos Básicos | Transporte de plantas, fertilizantes (NPK), control químico de hormigas, insecticidas, cal y análisis de suelo | $ 495,50 | $ 825,83 | 45,96 % |
| Mantenimiento (Año 1) | Roce, coronamiento, replante y monitoreo fitosanitario | $ 127,50 | $ 212,50 | 11,83 % |
| Total | Presupuesto Consolidado de Establecimiento Silvicultural | $ 1078,00 | $ 1796,67 | 100 % |

Las operaciones forestales eficientes son resultados de los estudios detallados sobre los costos de establecimientos de plantaciones que pueden variar de 930 a 2500 USD/ha, considerando los métodos de laboreo que pueden ser manual, semi – mecanizado y mecanizado Pérez et al. (2022). Otro estudio realizado por Melo et al. (2025) reportan que el costo de implementación es de 1576,89 USD/ha (8497,91 BRL/ha) en un manejo

predominantemente mecanizado, que integró actividades como siembra, fertilización, riego y aplicación de herbicidas.

La evaluación de la eficiencia de la inversión adicional realizada en el tratamiento T3 se correlaciona directamente con las variables morfológicas registradas posterior a los cuatro meses de fertilización. Estos datos muestran una expansión de 11, 13 %  en el presupuesto por concepto de insumos de fertilización, desencadenado una respuesta biológica altamente favorable en el rendimiento de los árboles. Los datos obtenidos a continuación justifican la inversión adicional, al aplicar 216 gr/NPK obtuvieron incrementos netos de 25% en altura total, 29% en diámetro de altura de cuello (DAC). El mismo comportamiento se observó en la arquitectura de la copa respondiendo positivamente a la inducción nutricional, registrando un incremento del 15%.

Estos atributos morfológicos ponen en evidencia la importancia de la fertilización para el crecimiento inicial, especialmente el diámetro de copa contribuyendo significativamente el cierre del dosel en el rodal durante las etapas tempranas del desarrollo. Desde una expectativa ecofisiología; el incremento en diámetro de copa favorece una ocupación más rápida del espacio aéreo disponible, acelerando el cierre del dosel forestal, permitiendo interceptar más radiación fotosintética y reducir la cantidad de luz que atraviesa al sotobosque, limitando el crecimiento de vegetación que compite por agua y nutrientes durante las fases iniciales del establecimiento de la plantación.

***Tabla 6.***

*Relación de inversión - beneficio entre el tratamiento T3 y T4 (control)*

| Componente Evaluado | T3 Con NPK (216 gr/planta) | T4 (Control) Sin fertilizante | Impacto Neto de la Inversión |
|---|---|---|---|
| Inversión Total USD/ha | $1.796,67 | $1.596,67 | 11,13% 200 USD/ha |
| Desarrollo en altura | 45% | 20% | 25 % Incremento en altura |
| Diámetro de cuello | 55% | 26% | 27% Incremento en diámetro |
| Diámetro de copa | 43% | 28% | 15 % Incremento en el cierre del dosel |

### *3.3.1 Costos de Mano de obra*

En el presente estudio, la mayor de las actividades de implantación fue ejecutadas mediante labores manual, lo que se tradujo en un costo de 842,59 USD/ha, lo que equivale al 42% del total invertido. Los datos se encuentran directamente asociada al rubro de mano de obra, el cual representa uno de los componentes más sensibles dentro de la estructura de costos del establecimiento.

Según datos económicos de la FAO (2020), los costos de establecimiento pueden situarse alrededor de 630 USD/ha en condiciones promedio; sin embargo, este valor puede incrementarse significativamente cuando las plantaciones se establecen en sitios con cobertura boscosa densa, topografía compleja o limitaciones edáficas, donde las labores de preparación del terreno y plantación demandan mayores esfuerzos operativos y consumo de mano de obra.

### *3.3.2 Costo de insumos*

La inclusión de insumos como fertilizantes NPK, transporte de plántulas control químico de hormigas, insecticidas y análisis de suelo representa el 46 % de la inversión,

proporción significativa de los costos operativos en plantaciones de *E. grandis*, especialmente cuando se busca maximizar la productividad inicial.

Estudios en plantaciones comerciales destacan que la fertilización química y el manejo fitosanitario contribuyen sustancialmente a la estructura de costos y pueden mejorar la productividad de la plantación. Según Melo (2025) compensar las pérdidas de nutrientes con fertilización puede incrementar los costos de establecimiento hasta en un 60%, lo que refleja la importancia de los insumos en el presupuesto. Además, el control de plagas, como el de las hormigas cortadoras, es una consideración productiva relevante, que suele recurrir a estrategias de manejo continuas que impactan los costos de insumos y mano de obra.

### *3.3.3 Costo de Mantenimiento*

Los costos de mantenimiento representan el 12% de los costos totales de la plantación en un año de ciclo del cultivo, donde actividades como deshierbe, coronamiento, replante y el monitoreo fitosanitario son indispensables para asegurar la supervivencia y el vigor inicial del rodal. La literatura forestal destaca que el control de malezas durante los primeros años posteriores a la plantación es crítico para reducir la competencia por luz, agua y nutrientes, por lo tanto, su manejo oportuno incrementa la productividad del rodal (Corticeiro et al., 2023). Estudia que detallan el mantenimiento silvicultural de las plantaciones forestales, el cual incluye deshierbe mecánico o químico y control de plagas y enfermedades, puede representar una proporción sustancial de los costos operativos durante las primeras etapas del desarrollo de las plantaciones, esto refleja la necesidad de una inversión continua en los insumos para sostener el crecimiento de los arboles y minimizar la pérdidas por competencia con maleza o mortalidad temprana (FAO, 2020). El enfoque preventivo de manejo, aunque eleva los costos iniciales, está asociada con una mejora de la rentabilidad a largo plazo al incrementar la tasa de sobrevivencia y reducir la necesidad de intervenciones correctivas más costosas en las fases posteriores

# CAPÍTULO IV
# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 4.1 Conclusiones

- Los hallazgos de esta investigación permiten concluir que la aplicación de 216 gr/planta de NPK 10-30-10 (T3) promueve un estímulo estadísticamente significativo ($p < 0,05$) en el crecimiento inicial y las variables dasométricas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden identificando una deficiencia de fósforo y potasio en los suelos del sitio. El tratamiento T3 fue el más efectivo para la corrección de dichas limitaciones, induciendo a un aumento netos del 25 % en altura total, 29 % en diámetro de cuello (DAC) y 15 % en diámetro de copa en comparación con los resultados obtenidos en el tratamiento control(T4).
- Respecto al análisis foliar, el tratamiento T3 mostró concentraciones óptimas de macronutrientes en las hojas, registrando valores de 22,8 gr/kg nitrógeno, 1,7 gr/kg fósforo y 8,4 gr/kg de potasio. A pesar de que la concentración de estos nutrientes y el área foliar obtuvo una variación de 17% respecto al testigo. Estas variables no mostraron diferencias estadísticamente significativas ($p >= 0,05$), la suficiencia nutricional alcanzada en el follaje operó como el soporte fisiológico que sustente el destacado incremento.
- Finalmente, la estimación de los costos de establecimiento inicial de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden en la zona de estudio requiere una inversión base de 1596,67 USD/ha bajo el tratamiento control (T4). La dosis T3, que mostró mayor desempeño biológico, demandó un incremento del 11,13 % en el presupuesto inicial. No obstante, este costo adicional se encuentra justificado técnicamente debido al estímulo inducido en el rodal.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda a los pequeños y medianos productores forestales de la parroquia Lita, (comunidad de Cachaco) y zonas edafoclimáticas similares de la región, la adopción e implementación de programas de fertilización basados en la dosis del tratamiento T3 (216 gr/planta de NPK), para el establecimiento de plantaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Esta dosis ha demostrado ser técnicamente idónea para superar limitaciones de suelos fuertemente ácidos (pH 5) y con baja disponibilidad fósforo asimilable (2,19 ppm) asegurando un óptimo vigor vegetativo inicial.
- Debido a que el presente estudio evaluó de forma estricta el crecimiento inicial durante los cuatro primeros meses, se recomienda a los gestores forestales diseñar un esquema operativo para el monitoreo continuo de la dinámica de competencia. Debido a que el tratamiento óptimo acelera significativamente la expansión de la copa y precipita al cierre temprano del dosel, para determinar con precisión cronológica el momento técnico ideal para los primeros raleos.
- Para la comunidad científica, se sugiere formular proyectos, desarrollar estudios a largo plazo que evalúen la respuesta de *E. grandis* a la fertilización durante todo el ciclo productivo, incorporando análisis ecofisiología, calidad de la madera y retorno económico del activo forestal en turnos de rotación completos.

# CAPÍTULO V

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA


Alarcón, P. (2018). Una metodología comparativa crítica aplicada al sistema constitucional ecuatoriano. *Derecho y Sociedad*. Obtenido de https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/7089/1/SDS-003-Alarcon-Una%20metodologia.pdf

Alvarado, A. (2022). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. *Revista Agronomía Costarricense*. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttextypid=S0377-94242012000100009

Alvarado, A., y Raigosa, J. (2012). *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales.* Costa Rica: Asociación Costarricense de Ciencias de Suelos .

Bauhus, J., Van der Meer, P., y Kanninen, M. (2010). *Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests* . Londres, Reino Unido: Routledge.

Bordron, B., Robin, A., Oliveira, I., Laclua, J., Jourdan, C., Nouvellon, Y., . . . Bouillet, J. (2019). Fertilization increases the functional specialization of fine roots in deep soil layers for young E.grandis trees. *Forest Ecology and Management*, 6-16. doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.018

Cabrera, A. (2024). Fertilidad del suelo: definición y algunas propiedades. *Revista Inca, 45*(2). Obtenido de http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v45n2/1819-4087-ctr-45-02-e06.pdf

Carvajal - Benavides, J. G. (2024). Planificación Territorial: Hacia una “Cultura Forestal Regenerativa”, aplicando proyectos de Educación Ambiental PEA para la gestión Urbana Sostenible, cantón Ibarra - Ecuador. *Innovascience Journal.*

Carvajal Benavides, J. G., Burgos Vera, W. A., y Paredes - Rodriguez, H. O. (2026). Análisis del índice de sitio y eficiencia volumétrica de Liquidambar styraciflua: Implicaciones

para la gestión forestal sostenible en los Andes ecuatoriales. *Revista JRG de Estudos Academicos, 9(18).*

Carvajal Benavides, Mugmal Farinango, Y. C., J. G., Rosales Enríquez, O. A., y Layana Bajaña, E. M., (2024). Diseño del Sistema Agroforestal Tradicional Andino, respetando la diversidad biocultural, en la comunidad quichua de el manzanal, parroquia Caranqui, Canton Ibarra. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS, 6(1). 366 - 389.* https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v6i1.1004

Carvajal Benavides, J. G., Paredes Rodriguez H. O., Rosales Enríquez, O. A., Mugmal Farinango, Y. C., y Layana Bajaña, E. M., y Varela Molina, E. M., (2023). Análisis de rentabilidad de un modelo agroforestal tradicional, en la comunidad Quichua El Manzanal, Ibarra - Ecuador. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 238 - 253. https://doi.org/10.59169/pentaciencias.v5i7.934

Carvajal Benavides, J. G., Sono Toledo, D. D., Arcos Unigarro, C. R., Basantes Vizcaíno, T. F., Paredes Rodríguez, H. O., & Varela Jácome, G. D. (2023). Caracterización de las propiedades organoléptica y anatómica de Juglans neotropica diels, (nogal) en la provincia de Imbabura. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, *5*(4).

Carvajal Benavides, J. G., Sono Toledo, D. D., López Narváez, A. L., Layana Bajaña, E. M., & Chagna Avila, E. J. (2023). Evaluación y análisis del factor de forma de Juglans Neotropica Diels en el predio de Yuyucocha, Cantón Ibarra. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(2), 10243–10262. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.6117

Carvajal Benavides, J. G., Valencia Valenzuela, X. G., Rosero Chamorro, E. G., y Flores Ruiz, J. A. (2023). Rol de Juglans neotropica Diels en la silvicultura urbana en

la parroquia San Francisco del cantón Ibarra, provincia Imbabura. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(1), 2993–3017. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4637

Carvajal Benavides, J. G., Yépez Duque, E. S., y Revelo Ruiz, S. V. (2023). Manejo forestal sostenible del Pambil en la amazonía ecuatoriana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(3), 5251–5277. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6548

Chambi, R., Tomazello, M., Laclau, J., y Chaix, G. (2023). Potassium fertilization enhances xylem plasticity and growth recovery of E.grandis trees in response to drastic changes in water availability. *Forest Ecology and Management*. doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120656.

Coronel, M. (2017). *Costos Forestales.* Repositorio de la Universidad Nacional de Santiago. Obtenido de https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/17113

Cortés, M. (2024). Generalidades sobre Metodología de la investigación. 10-18. Obtenido de https://www.unacar.mx/contenido/gaceta/ediciones/metodologia_investigacion.pdf

Corticeiro, Sofia; Maia, Paula; Goncalves, Catarina; Keizer, Jan Jacob; Valente, Carlos;. (2023). How Weed Control Affects Eucalyptus globulus Labill. Productivity: Results from Two Long-Term Trials. *Forests, 14*(10). doi:https://doi.org/10.3390/f14101958

Cuasquer, C. (2017). *Evaluación de crecimiento de acacia.* Ibarra: Repositoria Universidad Tècnica del Norte.

Ecuador Forestal. (22 de Octubre de 2012). *Fichas Técnicas para la Repoblación Forestal.* Obtenido de www.ecuadorforestal.org: https://ecuadorforestal.org/informacion-s-f-e/fichas-tecnicas-para-la-repoblacion-forestal/

Enríquez, G. (2018). *Análisis de los factores habilitantes para implementar un sistema agroforestal biodiverso con café, para incrementar la resiliencia al cambio climático*

*de las fincas y hogares de dos parroquias del Noroccidente de Quito.* Universidad Andina Simón Bolívar. Obtenido de https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6350/1/T2696-MDSCC-Enriquez-Analisis.pdf

Escobar, R. (2017). *Manual de viverización: Eucalyptus globulus a raíz cubierta. Instituto Forestal (INFOR).* Hualpén, Chile: Instituto Forestal. Obtenido de https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/17113

Eufrade, H., y Ballarin, A. W. (2017). Efecto del manejo silvícola sobre la densidad básica de la madera en sistemas forestales de rotación corta. *Maderas. Ciencia y tecnología*. Obtenido de http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2017005000024

FAO. (2020). Efectos ecológicos de los eucaliptos. *Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación*. Obtenido de https://www.fao.org/4/ap415s/ap415s00.pdf

Fiorentin dos Santos, M., y Reichert, J. (2022). Best tillage practice for eucalyptus growth and productivity: A review on the Brazilian experience. *Journal of Forestry Research*, 33(1), 123-137. doi:https://doi.org/10.1007/s11676-021-01356-7

Fonseca, D., Sono , D., Varela , E., Potosí , E., Carvajal, J., y Garzón, B. (2023). Análisis de Tratamientos Pregerminativos Químicos en Semillas de Juglans Neotropica Diels De Procedencia de San Blas, Cantón Urcuquí, Imbabura - Ecuador. *Ciencia Latina International*, 8428 - 8441. doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7571

García, M. (2023). Respuesta a la fertilización de otoño en plantaciones de eucalipto en Entre Ríos. *Revista de Ciencias Forestales, 21*(1), 16-25. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/481/48130000003.pdf

Aguilar, L. F., Carvajal Benavides, J. G., Valencia Valenzuela, X. G., Varela Molina, E. M., & Cuarán Guerrero, M. J. (2023). Diagnóstico del arbolado Urbano en la Ciudad de

Ibarra, como base para una gestión de arbolado más humano. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(2), 5613–5632. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i2.5743

Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Imbabura. (2023). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia de Imbabura 2023–2027. Obtenido de https://www.imbabura.gob.ec/phocadownloadpap/K-Planes-programas/PDOT/pdot_resumido_provincia_de_imbabura_2023-2027.pdf

Gonçalves, E., De Paula, R., De Souza, J., De Mello, R., Bomfim, M., y Ferreira, K. (2024). Silicon attenuates nutritional disorder of phosphorus in seedlings of E.grandis × Eucalyptus urophylla. *Revista BMC Plant Biology*, 2 - 15. doi:https://doi.org/10.1186/s12870-024-05147-9

Gonçalves, J., Stape, J., Laclau, J., Bouillet , J., y Ranger, J. (2019). Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 105 - 118. doi:10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534

Gonzáles, A., Ojeda, M., Hernández , M., Córdova, Y., Díaz , L., López, J., y Álvarez, J. (2019). Effect of biofertilizers application on the growth of E.grandis seedlings under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition, 42*(19), 2560-2576. doi:10.36783/18069657rbcs20210091

Gonzales, J., Seregui, E., Tertulina, J., Eiji, R., Henrique, J., Athayde, A., . . . De Vicente, A. (2020). Responses of Clonal Eucalypt Plantations to N, P and K fertilizer Application in Different Edaphoclimatic Conditions. *Forest*. doi:https://doi.org/10.3390/f7010002

González, A., y Duff, J. (2023). Estimación del Área Foliar y su Relación sobre algunos Caracteres Agro. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. doi: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7480

Graciano, C., y Goya, J. (2019). Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of E.grandis. *Forest Ecology and Management*, 45–53. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.005

Grover, Z., Cook, R., Zapata, M., Urrego, B., Albaugh, T., Zelaya, A., . . . Campoe, O. (2021). E.grandis Response to Calcium Fertilization in Colombia. *Forest Science*, https://doi.org/10.1093/forsci/fxab042. doi:https://doi.org/10.1093/forsci/fxab042

Guambo, V., Valenzuela, D., y Saeteros, A. (2020). Efectos de disoluciones nutritivas de nitrógeno, fósforo y potasio (N-P-K) sobre el crecimiento de plántulas de Juglans Neotropica Diels. *Revista Ciencia Digital, 22*(12), 236-252. Obtenido de https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i1.1097

Guarnaschelli, A., y Mantese, A. (2019). Cambios anatómicos y morfológicos en plántulas de Eucalyptus sp. en respuesta a diferentes niveles de luz. 273-285. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/262553293_Cambios_anatomicos_y_morfologicos_en_plantulas_de_Eucalyptus_sp_en_respuesta_a_diferentes_niveles_de_luz

Guerra, E., y Mosqueira, F. (2014). Efecto de la densidad de plantación en la rentabilidad de plantaciones de Eucalyptus globulus. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 20*(1). Obtenido de https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.08.051

Imbaquingo, J. (2021). *Determinación de un tratamiento para enraizamiento de clones de Eucalyptus globulus Labill en la hacienda Pisangacho, de la parroquia San Blas, cantón Urcuquí, provincia de Imbabura.* Universidad Técnica del Norte. Obtenido de https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/11095/2/03%20FOR%20325%20TRABAJO%20GRADO.pdf

INIAP. (2018). Guía para la priorización participativa de especies forestales. Obtenido de https://www.proamazonia.org/wp-content/uploads/2023/09/Manual-plantaciones-sep.pdf

Ipinza, R., y Barros, S. (2021). Bosques y Biodiversidad. *Ciencia y Investigación Forestal, 27*(1), 463–478. doi:https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.475

Laclau, P., Delgado, J., Christina, M., Nouvellon , Y., Bouillet, J., De Cassia, M., . . . Laclau, J. (2016). Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in E.grandis plantations. *Forest Ecology and Management*, 77 - 89. doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.004

León, D. (2022). *Relaciones morfométricas en dos plantaciones de Alnus acuminata kunth en la zona Estepa Espinoza Montano Bajo de la parroquia Cacha, cantón Riobamba.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de https://dspace.espoch.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/345df662-9e20-4a74-a44e-88127f03db3c/content

León, M., y Reyes, J. (2016). Efecto de la fertilización sobre el crecimiento en diámetro y altura de Pinus caribaea en plantaciones del occidente de Cuba. *Revista Madera y bosques, 22*(3). Obtenido de https://doi.org/10.21829/myb.2016.2231115

López, N., y Muñoz, J. (2017). La producción forestal es una actividad con alto potencial en el Ecuador requiere un cambio de visión. *Bosque Latitud Cero*, 7(1). 69 - 76. Obtenido de https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/186

Machacuay, A., y Llancari, Y. (2020). Efectos de dosis de nitrógeno sobre la producción de estaquillas de E.grandis x E. urophylla en jardín clonal. *Revista Forestal del Perú* , 5 - 17.

Melo, G., Araújo, T., da Costa, J., Jarochinski, C., de Castro, L., Rezende, L., . . . Gomes, L. (2025). Optimizing forest sector performance based on life cycle cost analysis and real options. *Science of The Total Environment*, 1 - 14. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179675

Meneses, C. (2016). *"Propuesta de elaboración del programa de corta para el aprovechamiento del Eucalyptus spp., en la Estación Experimental "La Favorita ".* Universidad Técnica del Norte. Obtenido de https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/5706/1/03%20FOR%20227%20TRABAJO%20GRADO.pdf

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2023). *Manual de buenas prácticas en plantaciones forestales comerciales (2.ª ed.).* Quito: Subsecretaría de producción forestal. Obtenido de https://www.proamazonia.org/wp-content/uploads/2023/09/Manual-plantaciones-sep.pdf

Monteoliva, S., Barotto, A., y Fernandez, M. (2015). Anatomía y densidad de la madera en Eucaliptus: variación interespecífica e implicancia en la resistencia al estrés abiótico. *Revista de la Facultad de Agronomía, 114*(2), 209-217. Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5718277.pdf

Montero, F., Valdez , J., De Los Santos , H., Cetina, V., y Sánchez, L. (2021). Initial growth of multi-purpose foresta species in a livestock land at the North of Veracruz. *Revista Forestal de Ciencias Forestales*, 55 - 68. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v2n3/v2n3a5.pdf

Morocho, S. (2016). *Prueba de la eficacia de dos fertilizantes inorgánicos foliares en el rendimiento del cultivo de col.* Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de https://dspace.espoch.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/da297307-fc15-4e8e-97ab-f8e80eede44d/content

Muller da Silva , P. (2011). *Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade, lixiviação e ciclagem de nutrientes em plantações de eucalipto.* Piracicaba: DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP.

Nouvellon, Y., Laclau, J., Epron, D., Kinana, A., Mobiala, A., Roupsard, O., . . . André, L. (2010). Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal Eucalyptus plantation in the Republic of Congo. *Forest Ecology and Management*, 1796 - 1807. doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.023

Osorio, N. (2012). Toma de muestras de suelos para evaluar la fertilidad del suelo. *Manejo Integral del Suelo y Nutriciòn Vegetal*, 1 - 4. Obtenido de http://www.walterosorio.net/web/sites/default/files/documentos/pdf/Toma_de_muestras_de_suelos_evaluacion_de_fertilidad_del_suelo.pdf

Osorio, W. (2020). *Toma de muestras de suelos para evaluar la fertilidad del suelo.* Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Obtenido de https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/17420/9850863.pdf

Palma, D., y Salgado, S. (2015). Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de Eucalipto de Tabasco, México. *Revista Ecosistemas y recursos agropecuarios, 2*(5). Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttextypid=S2007-90282015000200004

Paredes, C. (2024). Importancia de los micronutrientes en las plantas para un crecimiento saludable. *Revista Agrotey*. Obtenido de https://www.agrotey.com.mx/importancia-de-los-micronutrientes-en-las-plantas/

Paredes Rodríguez, H. O., Varela Jácome, G. D., Rosales Enríquez, O. A., Carvajal Benavides, J. G., & León-Espinoza, M. E. (2023). Herbario universidad técnica del norte HUTN, un laboratorio para conocer la diversidad de especies forestales del Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *7*(3), 1167–1184. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6262

Pérez, D., Ceballos, C., y Oneto, M. (2022). Outplanting and direct seeding costs of Prosopis flexuosa var. depressa (Fabaceae) for ecologicarestoration. *Revista Acta Botanica Mexicana*, 1 - 17. doi:https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1888

Prefectura de Imbabura. (2020). *Plan de forestación y reforestación de la provincia de Imbabura.* Ibarra. Obtenido de https://www.imbabura.gob.ec/phocadownloadpap/K-Planes-programas/CONGOPE%20PLAN%20FORESTAL.pdf

Quiñonez, K. (2018). *Desarrollo inicial en plantaciones de Ziziphus thyrsiflora Benth, Geoffroea spinosa Jacq y Handroanthus chrysanthus Jacq. En Jipijapa, Manabí, Ecuador.* Universidad Estatal del Sur de Manabí. Obtenido de https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/1336/1/UNESUM-ECU-ING.FORES.-2018-08.pdf

Rodríguez, J., y Álvarez, J. (2020). *Nutrición y fertilización de plantaciones forestales.* Santiago de Chile: Lom.

Sadiq, M., y Alasmari, A. (2024). Conservation tillage: A way to improve yield and soil properties and decrease global warming potential in spring wheat agroecosystems. *Frontiers in Microbiology*, 135-642. Obtenido de https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1356426

Santos, J; Barros, N;. (2021). Potassium nutrition improves stomatal regulation and photosynthetic efficiency in Eucalyptus hybrids. *Journal of Forestry Research, 35*(1), 875–1886. doi:https://doi.org/10.3724/SP.J.1258.2013.00096

Silva , H., Gazola, R., Marques, M., y Teixeira Filho. (2019). Crescimento inicial de clones de Eucalyptus em função da adubação de NPK. *Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas*, 44 - 50. Obtenido de https://doi.org/10.18011/bioeng2019v13n1p44-50

Silva, R; Oliveira, F; Raimondi, M;. (2020). Nitrogen and phosphorus effects on early growth and biomass allocation in E.grandis. *Australian Forestry*, 150–159. doi:https://doi.org/10.3724/SP.J.1258.2013.00096

Solano, S. (2024). Fertilizantes en la producción agrícola: un análisis de la percepción de uso. *Apuntes del Cenes, 43*(78). Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttextypid=S0120-30532024000200209ylng=esynrm=is

Solis, K., y Quiroz, F. (2017). Biofertilizantes una alternativa ecológica para la agricultura frente al cambio. *Revista Ciencias, 3*(4), 75-88. Obtenido de https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6155630.pdf

Soto, F., y Angulo, M. (2024). Concentración de nitrógeno y clorofila en hojas de chile dulce hidropónico en invernadero bajo diferentes estrategias de manejo del riego y la nutrición. *Agronomía Costarricense, 2*(1). doi:http://dx.doi.org/10.15517/rac.v48i1.59126

Taiza, L., Zeiger, E., Møller, I., y Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development Sixth Edition* . Canada: Sinauer Associates, Inc.

Talles, R., Jiménez, J., Alanís, E., Aguirre, O., y Treveño, E. (2022). Crecimiento de las plantaciones forestales; un análisis del estado actual de las tendencias mundiales . *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 1 - 15.

Tituaña, M., y Nicolalde, L. (2019). Aprovechamiento de plantaciones forestales en Imbabura, Ecuador. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología, 8*(2). doi: https://doi.org/10.59410/RACYT-v08n02ep01-0110

Torres, L., de Andrade, S., y Mazzafera, P. (2025). Phosphorus Uptake in Eucalypt Plants Under Split Root System. *Tropical Plant Biology*, 18 - 40. doi:https://doi.org/10.1007/s12042-025-09410-7

Ugalde, L. (1981). *Conceptos básicos de dasometría.* Costa Rica: CATIE.

Vera, J. (2020). *Principios de la movilidad acropetal de nutrientes por el tejido.* Universidad Técnica de Babahoyo. Obtenido de https://dspace.utb.edu.ec/server/api/core/bitstreams/64124f9f-70a8-46cb-b64e-faedbed64a68/content

White, J., y Scott, N. (2006). Specific leaf area and nitrogen distribution in New Zealand forests: Species independently respond to intercepted light. *Forest Ecology and Management*, 319 - 329. doi:https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.001