



Escuela para graduados Ing. Agr. Alberto Soriano

Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

Tesis presentada para optar por el título de Magister de la Universidad de Buenos Aires

Área: Ciencias del Suelo

Orientación: Fertilidad de Suelos

Evaluación productiva de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden asociadas a distintos manejos de acuerdo al tipo de suelo en Entre Ríos, Argentina.

**Leanne A.
Urriola S.**

Ingeniera en Manejo de Cuencas y Ambiente – Universidad de Panamá

Catedra: Fertilidad y Fertilizantes

COMITÉ CONSEJERO

Directora de Tesis

Patricia L. Fernández

Ingeniera Agrónoma, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Doctora en Ciencias Agropecuarias, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Codirectora de Tesis

Ana M. Lupi

Ingeniera Forestal, Universidad Nacional de Misiones, Argentina.

Magister Scientiae en Ciencias del Suelo, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Consejera de Tesis

Carina R. Álvarez

Ingeniera Agrónoma, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Magister Scientiae en Ciencias del Suelo, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Doctora en Ciencias Agropecuarias, Universidad de Buenos Aires, Argentina.

AGRADECIMIENTOS

A José, padre dedicado, quien me brindo todo su apoyo y cuidado de nuestro hijo mientras yo cumplía mi sueño de superación profesional.

A Diego Elías, amoroso hijo, quien a tan corta edad supo entender y aceptar las decisiones tomadas por su madre.

A Olga, madre y abuela abnegada que siempre ha estado para mí cuando más la he necesitado.

A Berta, por haber criado a un hombre ejemplar y seguir guiando a un nieto maravilloso.

A Patricia Fernández, Ana Lupi y Carina Álvarez, quienes con su guía, consejos y enseñanzas contribuyeron a mi crecimiento académico y profesional, permitiéndome llegar a la meta de este ambicioso proyecto.

A el campo El Potrero de San Lorenzo, por hospedarme y permitir la realización de este proyecto en sus instalaciones.

A la cátedra de Fertilidad y Fertilizantes y la cátedra de Edafología, a todo su personal docente y no docente, quienes me brindaron su apoyo y guía.

A toda mi familia y amigos.

DECLARACIÓN

“Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.”

Ing. Leanne Anabel Urriola Sucre

Índice General

Índice General	vi
Índice de Figuras	x
Índice de Tablas	xv
Índice de abreviaturas	xvii
Resumen	xix
Abstract	xxi
1. Capítulo.....	22
Introducción	22
1.1. Introducción	23
1.1.1. Bosques y plantaciones forestales a nivel Mundial.....	23
1.1.2. Situación del área con bosques en Argentina.....	24
1.1.3. Características de los suelos de la provincia de Entre Ríos	26
1.1.4. Crecimiento de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden y su relación con el tipo de suelo.....	28
1.1.5. Producción forestal y manejo silvicultural de la especie	30
1.2. Objetivo General	31
1.3. Descripción del Área de Estudio.....	32
1.3.1. Ubicación Geográfica, características climáticas y edáficas de la zona bajo estudio 32	
1.3.2. Selección del Área Experimental	34
1.3.3. Suelos arcillosos.....	34
1.3.4. Suelos arenosos	36
2. Capítulo.....	37
Evaluación del estado hidrofísico residual del suelo bajo diferentes sistemas de preparación del suelo y su efecto sobre el crecimiento de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden	37
2.1. Introducción	38
2.2. Objetivos	41

2.2.1.	Objetivo General	41
2.2.2.	Objetivos Específicos	41
2.3.	Hipótesis.....	41
2.4.	Materiales y Métodos	42
2.4.1.	Tratamientos y diseño del ensayo	42
2.4.2.	Muestreo y determinaciones realizadas	43
2.5.	Análisis Estadístico	48
2.6.	Resultados	49
2.6.1.	Caracterización del Suelo.....	49
2.6.3.	Relación entre las variables edáficas y dasométricas.....	58
2.6.4.	Efecto de los tratamientos sobre variables dasométricas	60
2.7.	Discusión.....	73
2.8.	Conclusión	78
3.	Capítulo.....	79
	Respuesta de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden a la fertilización inicial en un suelo arenoso	79
3.1.	Introducción	80
3.2.	Objetivos	83
3.2.1.	Objetivo General.....	83
3.2.2.	Objetivos específicos	83
3.3.	Hipótesis.....	83
3.4.	Materiales y métodos	84
3.4.1.	Tratamientos y diseño del ensayo	84
3.4.2.	Muestreo y Análisis Realizados	86
3.5.	Análisis estadístico.....	87
3.6.	Resultados	88
3.6.1.	Caracterización del Suelo.....	88

3.6.2. Efecto de los tratamientos sobre la sobrevivencia de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden (mediciones realizadas a los 11 meses de establecida la plantación).	
89	
3.6.3. Efecto de los tratamientos sobre la altura medida de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden (a los 11 meses).....	92
3.6.4. Efecto sobre el área basal estimada (AB) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden (2 años de la plantación).....	95
3.8. Conclusión	99
4. Capítulo.....	100
Respuesta de plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden a la fertilización potásica en condiciones de estrés hídrico.....	100
4.1. Introducción	101
4.2. Objetivos	104
4.2.1. Objetivo General.....	104
4.2.2. Objetivos Específicos.....	104
4.3. Hipótesis.....	104
4.4. Materiales y Métodos	105
4.4.1. Muestreo y determinaciones de Laboratorio	106
4.5. Análisis estadístico.....	109
4.6. Resultados	110
4.6.1. Efecto de la fertilización y el contenido hídrico del suelo sobre <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden.	110
4.6.2. Biomasa de plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> Hill Ex Maiden bajo diferentes tratamientos de fertilización y contenidos hídricos.	113
4.6.3. Evaluación de la conductancia estomática y el contenido relativo de agua de <i>Eucalyptus Grandis</i> Hill Ex Maiden.....	116
4.7. Discusión.....	118
4.8. Conclusión	121
5. Capítulo.....	122
Conclusión General	122

6. Bibliografía	125
7. Apendices	143

Índice de Figuras

Figura 1.1. Ubicación del área de estudio.	33
Figura 2.1. Lectura de raíces en el perfil del suelo.	44
Figura 2.2. Esquema de medición de la resistencia a la penetración (RP). Áreas muestreadas ES (entre surco) y LP (línea de plantación).	47
Figura 2.3. Sortividad (Sort) para la preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas para entre tratamiento, con el test de LSD <i>Fisher</i> ($P < 0,05$).	52
Figura 2.4. Test de humedecimiento rápido del suelo (T1) para los manejos de preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, con el test de LSD <i>Fisher</i> ($P < 0,05$).	53
Figura 2.5. Estabilidad Estructural del suelo (EE), para los manejos de preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, con el test de LSD <i>Fisher</i> ($P < 0,05$).	54
Figura 2.6. (a) Contenido de materia orgánica (%) para el estrato 0-10 cm (MO 0-10). (b) Contenido de materia orgánica (%) para el estrato 10-20 cm (MO 10-20 cm), para la preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas para entre tratamientos, con el test de LSD <i>Fisher</i> ($P < 0,05$).	55
Figura 2.7. Contenido de hídrico en Punto de Marchitez Permanente (PMP, %) para la preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas para entre tratamientos, con el test de LSD <i>Fisher</i> ($P < 0,05$).	56
Figura 2.8. Porosidad total del suelo (PT, %) para las posiciones muestreadas ES (entre surco) y LP (línea de plantación). Letras distintas indican diferencias significativas para entre tratamiento, con el test de LSD <i>Fisher</i> ($P < 0,05$).	57
Figura 2.9. (a) Diámetro a la altura del pecho (DAP) y (b) área basal (AB) para diferente preparación del terreno a los 2 años de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas para el test de LSD <i>Fisher</i> ($P < 0,05$).	60

Figura 2.10. Resistencia a la penetración evaluada a los 0 cm de distancia del árbol. Evaluación realizada hasta los 20 cm de profundidad. Tratamientos evaluados: C+S, C y S. Diferencias estadísticas ($P < 0,05$) se indican con letras distintas.....	64
Figura 2.11. Resistencia a la penetración evaluada a los 45 cm de distancia del árbol. Evaluación realizada hasta los 20 cm de profundidad. Tratamientos evaluados: C+S, C y S. Diferencias estadísticas ($P < 0,05$) se indican con letras distintas.....	65
Figura 2.12. Resistencia a la penetración evaluada a los 90 cm de distancia del árbol. Evaluación realizada hasta los 20 cm de profundidad. Tratamientos evaluados: C+S, C y S. Diferencias estadísticas ($P < 0,05$) se indican con letras distintas.....	66
Figura 2.13. Perfiles de resistencia a la penetración de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento C, de la parcela 4, individuo 2. En cada cuadrante aparece el valor de resistencia a la penetración obtenido para ese punto de medición. Colores diferentes indican grado de resistencia a la penetración que ofrece el suelo, menores resistencias aparecen con un color verde, mayores resistencias se presentan con un color naranja a rojo. La imagen del árbol indica la línea de plantación.....	67
Figura 2.14. Resistencia a la penetración en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento C+S, de la parcela 3, individuo 1. En cada cuadrante aparece el valor de resistencia a la penetración obtenido para ese punto de medición. Colores diferentes indican grado de resistencia a la penetración que ofrece el suelo, menores resistencias aparecen con un color verde, mayores resistencias se presentan con un color naranja a rojo. La imagen del árbol indica la línea de plantación.....	68
Figura 2.15. Resistencia a la penetración en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento S, de la parcela 1, individuo 2. En cada cuadrante aparece el valor de resistencia a la penetración obtenido para ese punto de medición. Colores diferentes indican grado de resistencia a la penetración que ofrece el suelo, menores resistencias aparecen con un color verde, mayores resistencias se presentan con un color naranja a rojo. La imagen del árbol indica la línea de plantación.....	69
Figura 2.16. Presencia y tamaño de raíces en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento C, de la parcela 4, individuo 2. En cada cuadrante aparece la cantidad de raíces encontradas y el tamaño al cual corresponden. Colores diferentes indican mayor o menor presencia de raíces, colores grises más claros indican una menor presencia; colores más oscuros como el negro indican un mayor número de raíces totales.....	70

Figura 2.17. Presencia y tamaño de raíces en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento C+S, de la parcela 3, individuo 1. En cada cuadrante aparece la cantidad de raíces encontradas y el tamaño al cual corresponden. Colores diferentes indican mayor o menor presencia de raíces, colores grises más claros indican una menor presencia; colores más oscuros como el negro indican un mayor número de raíces totales.....	71
Figura 2.18. Presencia y tamaño de raíces en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento S, de la parcela 1, individuo 2. En cada cuadrante aparece la cantidad de raíces encontradas y el tamaño al cual corresponden. Colores diferentes indican mayor o menor presencia de raíces, colores grises más claros indican una menor presencia; colores más oscuros como el negro indican un mayor número de raíces totales.	72
Figura 3.1. Ubicación de los bloques en el terreno.....	86
Figura 3.2. Toma de muestras en el suelo arenoso.	86
Figura 3.3. Porcentaje de sobrevivencia de <i>Eucalyptus grandis</i> a los 11 meses de la plantación en cada uno de los bloques del ensayo Letras distintas indican diferencias significativas entre bloques ($P < 0,05$).....	90
Figura 3.4. Porcentaje de sobrevivencia de <i>Eucalyptus grandis</i> como resultado de la interacción significativa ($P=0,0392$) de las dosis de fósforo (0, 90, 100 gP/pl) y potasio (0, 50, 100 gK/pl) a los 11 meses de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).....	91
Figura 3.5. Alturas medias de <i>Eucalyptus grandis</i> para los bloques a los 11 meses de la plantación. Las barras indican error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre bloques, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).....	93
Figura 3.6. (a) Alturas medias de <i>Eucalyptus grandis</i> para las dosis de fertilización con nitrógeno (0, 45, 90 gN/pl) y (b) fósforo (0, 90, 180 gP/pl) a los 11 meses de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas entre dosis, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).....	93
Figura 3.7. Alturas medias de <i>Eucalyptus grandis</i> obtenidas en los tratamientos establecidos con dosis de fósforo (0, 90, 180 gP/pl) y potasio (0, 50, 100 gK/pl), a los 11 meses de establecida la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).....	94

Figura 3.8. (a) Área basal (AB) y (b) diámetro a la altura del pecho (DAP) de <i>Eucalyptus grandis</i> por bloque a los 2 años de Letras distintas indican diferencias significativas entre bloques, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).....	96
Figura 4.1. Medición de la altura de las plantas.....	107
Figura 4.2. Incremento relativo (IR) en: (a) altura y (b) diámetro a la altura del cuello (DAC) en plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> , bajo diferentes dosis de potasio (1:0, 2:1,29, 3:2,59 g K) y de contenido hídrico (A1: capacidad de campo y A2: 40% menos de CC).	111
Figura 4.3. Incremento relativo (IR) en diámetro a la altura del cuello (DAC) en plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> , bajo diferentes condiciones de contenido hídrico (1: capacidad de campo y 2: 40% menos de CC). Letras distintas indican diferencias significativas entre el factor contenido hídrico, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$). 112	112
Figura 4.4. Incremento relativo (IR) en altura, en plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> , bajo diferentes dosis de contenido hídrico (1: capacidad de campo y 2: 40% menos de CC). Letras distintas indican diferencias significativas entre el factor contenido hídrico, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).	113
Figura 4.5. Partición de la Biomasa seca de tallos y ramas, hojas y raíces en plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> , bajo diferentes niveles de contenido hídrico. Contenido hídrico del suelo a capacidad de campo (A1), contenido hídrico a menos del 40% de capacidad de campo (A2). Letras distintas indican diferencias significativas entre el factor contenido hídrico, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).....	114
Figura 4.6. Relación de la Biomasa Aérea (BA) y Biomasa Radical (BR) en plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> , bajo diferentes dosis de potasio (1:0, 2:1,29, 3:2,59 g K) y de contenido hídrico (1: capacidad de campo y, 2: 40% menos de CC). Letras distintas indican diferencias significativas para cada tratamiento, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).	115
Figura 4.7. Área foliar (AF) en plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> , bajo dos niveles de contenido hídrico: contenido hídrico a capacidad de campo (A1), contenido hídrico a 40% de capacidad de campo (A2). Letras distintas indican diferencias significativas para cada contenido hídrico, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).	116
Figura 4.8. (a) Contenido relativo de agua (CRA) y (b) Conductancia estomática (CE) en plantines de <i>Eucalyptus grandis</i> , evaluados en tres momentos durante el desarrollo del ensayo. Agua a capacidad de campo (A1), agua a menos del 40% de capacidad de	

campo (A2). Letras distintas indican diferencias significativas para cada contenido hídrico dentro de cada fecha, con el test de LSD *Fisher* ($P < 0,05$). 117

Índice de Tablas

Tabla 1.1: Distribución de las plantaciones forestales. Hectáreas por provincia y región y por especie. Año 2017.....	25
Tabla 2.1. Contenido promedio de arena, limo, arcilla del suelo, materia orgánica (MO), pH, y densidad de partícula (Dr), en cada uno de los estratos: 0-5 cm; 5-10 cm; 10-15 cm; 15-20 cm, para los manejos de preparación del suelo: camellón (C), subsolado (S) y camellón+subsolado (C+S). Entre paréntesis se presenta el error estándar. Letras mayúsculas indican diferencias entre tratamientos y letras minúsculas indican diferencias entre estratos de profundidad.....	50
Tabla 2.2. Evaluación de los tratamientos y la posición sobre las propiedades hidrofísicas del suelo. Muestreo en la línea de plantación (LP) y en el entre surco (ES).	51
Tabla 2.3. Correlaciones de Pearson entre las variables densidad aparente (DA), densidad real (Dr), porosidad total (PT), contenido de humedad a punto de marchitez permanente (PMP), contenido de humedad a capacidad de campo (CC), conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), test de humedecimiento rápido (T1), test de agitación mecánica (T2), test de humedecimiento lento (T3), estabilidad estructural (EE), porosidad de agregados (P_{agreg}), sortividad (Sort), porcentaje de materia orgánica de 0-10 cm de profundidad (MO 0-10 cm) y porcentaje de materia orgánica de 10-20 cm de profundidad (MO 10-20 cm), diámetro promedio a la altura del pecho (DAP), área basal promedio (AB).....	59
Tabla 2.4. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración (RP) y el número de raíces de acuerdo a la clasificación (raíces finas (Rz _{fina}): < 0,14 mm; raíces medias (Rz _{med}): 0,14 – 0,37 mm; raíces gruesas (Rz _{grue}): > 0,37 mm), para los tratamientos camellón (C), subsolado (S), camellón + subsolado (C+S), realizado en la línea de plantación del árbol: 0 cm, y en dirección perpendicular a la línea de plantación: 45 cm y 90 cm del árbol. LSD Fisher ($P < 0,05$).....	62
Tabla 3.1. Identificación de los 27 tratamientos resultado de los tres nutrientes (N: nitrógeno, P: fósforo y K: potasio), fuentes: Urea (U), superfosfato triple (SFT) y cloruro de potasio (ClK), y las dosis de acuerdo al nutriente (N: 0,45,90, P: 0.90.180, K:0, 50, 100).	85
Tabla 3.2. Caracterización de suelo en relación a la distribución de tamaños de partículas (DTP) y tamaños arenas (>0,5, 0,5-0,25, 0,25-0,1, 0,1-0,05 mm) densidad real (Dr) y contenido de carbono orgánico del suelo (CO) para los bloques I, II y III. Valores	

entre paréntesis corresponden al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre bloques mediante el test LSD Fisher ($P < 0,05$).....	88
Tabla 3.3. Resultados del análisis estadístico del efecto bloque (Bl.), de las dosis de los nutrientes: Nitrógeno (0, 45, 90 gN/pl), fósforo (0, 90, 180 gP/pl) y potasio (0, 50, 100gK/pl); y de la interacción entre las dosis de nutrientes (N*P, N*K, P*K, N*P*K) sobre la sobrevivencia de <i>Eucalyptus grandis</i> a los 11 meses de la plantación.....	89
Tabla 3.4. Evaluación de los tratamientos sobre la altura de <i>Eucalyptus grandis</i> , a los 11 meses de establecida la plantación.	92
Tabla 3.5. Evaluación de los tratamientos y su influencia sobre el DAP y el AB de <i>Eucalyptus grandis</i> , a los 2 años de establecida la plantación.	95
Tabla 4.1. Caracterización de los suelos: distribución de tamaño de partículas (arena, limo, arcilla), tipo textural, densidad de partícula, carbono orgánico (CO) y concentración de nutrientes como: calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu).....	106
Tabla 7.1. Evaluación del contenido de nutrientes del suelo , en las parcelas de los tratamientos de Camellón + Subsolado (C+S), Camellón (C) y Subsolado (S). Muestreo realizado por estratos (0-5cm; 5-10cm; 10-15cm; 15-20cm) en el entre surco (ES) y en la línea de plantación (LP).	144
Tabla 7.2. Evaluación de los tratamientos sobre las propiedades hidro-físicas del suelo.	145

Índice de abreviaturas

AB: Área basal

AF: Área foliar

A1: Agua a capacidad de campo

A2: Agua al 40% de capacidad de campo

Bl: Bloque

C: Camellón

CC: Capacidad de campo

CE: Conductancia estomática

ClK: Cloruro de potasio

CO: Carbono orgánico

CRA: Contenido relativo de agua

C+S: Camellón + Subsolado

DA: Densidad aparente

DAC: Diámetro a la altura del cuello

DAP: Diámetro a la altura del pecho

Dr: Densidad de partícula

DTP: Distribución del tamaño de las partículas del suelo

EE: Estabilidad estructural

ES: Entre surco

IR: Incremento relativo

K_{sat} : Conductividad hidráulica saturada

LP: Línea de plantación

MO: Materia orgánica

P_{agreg}: Porosidad de agregados

PMP: Punto de marchitez permanente

PT: Porosidad total

RP: Resistencia a la penetración

Rz _{fina}: Concentración de raíces finas

Rz_{grue}: Concentración de raíces gruesas

Rz_{med}: Concentración de raíces medias

Rz_{tot}: Concentración de raíces totales

S: Subsulado

SFT: Super fosfato triple

Sort: Sortividad

T1: Pre-tratamiento 1

T2: Pre-tratamiento 2

T3: Pre-tratamiento 3

U: Urea

Resumen

La actividad forestal en la República Argentina representa una actividad importante, en particular, para las regiones forestales como lo es la Mesopotamia Argentina. Estas explotaciones por lo general se sitúan sobre suelos de diferentes texturas como lo pueden ser los suelos de tipo arcillosos y los suelos arenosos. Estos suelos presentan ventajas y desventajas para la producción forestal. El *Eucalyptus grandis* puede presentar una reducción en la capacidad productiva cuando los suelos tienen impedancias y/o restricciones físicas en suelos con altos contenidos de arcilla, así como también deficiencia nutricional y baja retención hídrica propia de los suelos de texturas más gruesas. Es por ello que el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la preparación (camellón, subsolado) de suelos arcillosos y la fertilización (fósforo, potasio y nitrógeno) en suelos arenosos, en la producción forestal de *Eucalyptus grandis*. En el caso de los suelos arcillosos se encontró que los tratamientos que incluían camellón contribuyeron a promover el crecimiento de *Eucalyptus grandis*, favoreciendo mayores diámetros y área basal, además de contribuir con un estado de residualidad de las variables hidrofísicas. En el caso de los suelos arenosos evaluados a campo, se encontró que el fósforo y potasio presentaron interacción en las respuestas de variables dasométricas de *Eucalyptus grandis* (altura, DAP, AB), aumentando en dosis intermedias de los nutrientes y disminuyendo en las dosis más altas; La adición de nitrógeno, en conjunto con el fósforo también presentó efectos positivos en el crecimiento de las plantas, contribuyendo con el aumento del mismo. En invernáculo, la fertilización diferencial de potasio no mejoró la performance de *Eucalyptus grandis* en condiciones restringidas de agua. La evaluación de los suelos bajo estudio posibilitó el

conocimiento de las características físicas y químicas que han influenciado sobre la producción forestal del sitio, lo que ha permitido establecer un manejo adecuado que garantice un aumento en los beneficios de la producción forestal.

Abstract

The forest activity in the Argentine Republic represents an important activity, in particular, for the forest regions such as the Argentine Mesopotamia. These farms are generally located on soils of different textures, such as clay-type soils and sandy soils. These soils present advantages and disadvantages for forestry production. *Eucalyptus grandis* can present a reduction in productive capacity when the soils have impedances and/or physical restrictions in soils with high clay content, as well as nutritional deficiency and low water retention typical of soils with coarser textures. That is why the objective of this work was to evaluate the effect of the preparation (ridge, subsoil) of clay soils and fertilization (phosphorus, potassium, and nitrogen) in sandy soils, in the forest production of *Eucalyptus grandis*. In the case of clay soils, it was found that the treatments that included ridges contributed to promote the growth of *Eucalyptus grandis*, favoring larger diameters and basal area, in addition to contributing to a state of residuality of the hydrophysical variables. In the case of sandy soils evaluated in the field, it was obtained that phosphorus and potassium presented an interaction in the responses of dasometric variables of *Eucalyptus grandis* (height, DBH, AB), increasing in intermediate doses of nutrients and decreasing in taller doses; The addition of nitrogen, together with phosphorus, also had positive effects on plant growth, contributing to its increase. In the greenhouse, differential potassium fertilization did not improve the performance of *Eucalyptus grandis* in restricted water conditions. The evaluation of the soils under study made possible to know about the physical and chemical characteristics that have influenced the forest production of the site, which has allowed establishing an adequate management that guarantees an increase in the benefits of forest production.

1. Capítulo

Introducción

1.1. Introducción

1.1.1. Bosques y plantaciones forestales a nivel Mundial

Se estima que el área de bosques a nivel mundial es de 4.060 millones de hectáreas (ha). Alrededor de 131 millones de hectáreas corresponden a plantaciones forestales, de las cuales la proporción más alta se encuentra en América del Sur. Existen otros bosques plantados los cuales no se manejan de manera intensiva y pueden parecerse a los bosques naturales en la madurez de los rodales, siendo los propósitos principales de estos bosques la restauración del ecosistema y la protección de los valores del suelo y agua (representan el 4 % de la superficie forestal mundial y el 55 % de todos los bosques plantados a nivel mundial). A pesar de abarcar casi un tercio de la superficie total de la tierra, la superficie forestal mundial ha disminuido desde 1990, con pérdidas de 178 millones de hectáreas. Sin embargo, el ritmo de pérdidas netas de áreas forestales ha disminuido en los últimos años, debido a una reducción de la deforestación en algunos países y un aumento de la superficie forestal en otros a través de la forestación y la expansión natural de los bosques (FAO, 2020).

El plan estratégico de las Naciones Unidas para los bosques propuso, en el año 2017, aumentar en un 3% la superficie forestal a nivel mundial (con respecto a los valores medidos en el año 2015) para el año 2030, meta que forma parte del decenio de las Naciones Unidas sobre la Restauración de los Ecosistemas (2021-2030) y cuyos objetivos principales son el prevenir, detener e invertir la degradación de los ecosistemas y concientizar sobre la importancia de la restauración de los ecosistemas. El cumplimiento de esta meta contribuye a cumplir con el Objetivo del Desarrollo Sostenible (ODS) que promueve la lucha contra la desertificación, la rehabilitación de

las tierras y suelos degradados, incluidas las tierras afectadas por la desertificación, la sequía y las inundaciones, procurando lograr un mundo con efecto neutro en la degradación del suelo (FAO, 2020).

1.1.2. Situación del área con bosques en Argentina

Actualmente Argentina cuenta con un patrimonio de 1,3 millones de hectáreas de plantaciones forestales y 53,6 millones de hectáreas de bosques nativos, según los Ordenamientos Territoriales de Bosques Nativos (OTBN) provinciales. Existen 3,7 millones de hectáreas de tierras forestales disponibles, las cuales no afectan sitios de alto valor de conservación, ni compiten con bosques nativos, ni con otros cultivos. Además de ello, Argentina cuenta con zonas de alta productividad forestal, que permiten turnos de corta de 9 a 15 años en promedio y suelos aptos para su uso forestal (MAGyP, 2019).

La madera proveniente de las plantaciones forestales cubre la mayor parte de la demanda de materia prima de las industrias de base forestal. La mayor parte del consumo nacional de madera corresponde a especies implantadas. El 98% de la extracción total son rollizos para uso industrial y el resto corresponde a leña y postes. Entre las especies más utilizadas se encuentra el eucalipto. En cuanto a la distribución provincial de la extracción de productos de bosques implantados, de la provincia de Entre Ríos se obtiene el 17% de las extracciones totales a nivel nacional.

El 78% de la superficie forestada se concentra en la Mesopotamia (provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos). En la Tabla 1.1 se presenta información de la distribución de las plantaciones forestales de todo el país, en el año 2017 (incluidas las forestaciones de la zona del Delta cercana a Entre Ríos).

Tabla 1.1: Distribución de las plantaciones forestales. Hectáreas por provincia y región y por especie. Año 2017.

Provincia/Región	Superficie por especie (hectáreas)				Totales (hectáreas)
	Coníferas	<i>Eucalyptus</i> <i>spp</i>	Salicáceas	Otras	
Corrientes	345.965	121.857		6.161	473.983
Misiones	348.305	40.902		16.617	405.824
Entre Ríos	14.156	112.785	23.279	577	150.797
Buenos Aires	4.027	7.818	65.091	78	77.014
Patagonia	109.031		1.744		110.775
Noroeste	5.404	15.875	114	3.654	25.047
Centro	34.172	14.632	1.602	2.520	52.926
Cuyo			8.015		8.015
Resto	290			13.122	13.412
Total País	861.350	313.869	99.845	42.729	1.317.793

Fuente: Informes de Cadenas de Valor. Forestal, papel y muebles, 2019.

En particular en la provincia de Entre Ríos predominan las forestaciones con *Eucalyptus grandis* o sus clones e híbridos con *Eucalyptus camaldulensis* y *Eucalyptus tereticornis* (Flores, 2016). Estas forestaciones se ubican sobre las terrazas del Río Uruguay principalmente, en una franja de 20 km paralela a la costa del mencionado río, sobre suelos arenosos. El *Eucalyptus grandis* presenta un rápido crecimiento, y según indican los incrementos anuales medios que oscilan entre 25 y 50 m³/ha/año, lo que permite rotaciones de 10 a 15 años cuando el destino de la madera es el aserrado, pudiendo ser menores si el destino final es la pulpa celulósica (Flores, 2016).

Ibañez et al., 2004 menciona que es necesaria la implementación de prácticas que promuevan la conservación y el mejoramiento de la capacidad productiva de los suelos y, a su vez, generar técnicas de manejo de fácil implementación y que permitan aumentar la supervivencia y crecimiento de las plantaciones.

1.1.3. Características de los suelos de la provincia de Entre Ríos

Según el Mapa de Suelos de Entre Ríos (2000) es durante el Cuaternario (Pleistoceno – Holoceno) cuando se depositaron los sedimentos que conformaron los materiales parentales generadores de los principales suelos del área. El más importante y extendido está compuesto por los espesos sedimentos de la Formación Hernandarias, de origen lacustre – palustre, con alto contenido de arcilla expansible. Esta Formación es muy importante por su distribución superficial y porque compone el material parental que genera a los suelos de los órdenes Vertisoles y Alfisoles. Los Vertisoles se encuentran en un paisaje de peniplanicie muy suavemente ondulada, con pendientes generalmente largas (0,5 – 2,5 %) aunque se los puede hallar en peniplanicies onduladas con pendientes de hasta 4 %. Estos suelos presentan textura fina con un contenido entre el 40-50 % de arcilla, sobre todo del tipo de las esmectitas (más del 50 % sobre el total de arcillas) (Tasi, 2009). El material es muy expansible, se contrae cuando están secos, formando grandes grietas, que se cierran cuando el suelo está húmedo (Cerana et al., 2005). Este cambio según su grado de humectación provoca movimientos en masa dentro del perfil. La propiedad expansible de estos suelos se observa mediante el coeficiente de extensibilidad lineal (COLE), siendo éste superior a 0,16 llegando a valores máximos de 0,23 (Tasi, 2000). Presentan, además, alta adhesividad, por lo cual se traslada esta característica hacia las herramientas de laboreo, lo que explica las serias limitaciones de estos suelos ante labranzas en condiciones de humedad elevada. Son suelos oscuros y se caracterizan por poseer un buen nivel de materia orgánica. Muchos Vertisoles presentan micro relieve gilgai. Estos son pequeños altibajos del terreno en forma cíclica, que se deben al movimiento en masa del suelo por cambios en su estado

de humedad. Otras características adicionales son las caras de fricción (slickensides) y la autoestructuración (selfmulching). Esta última es la estructura propia del horizonte superior debido al alto contenido de arcillas expansibles, las que al contraerse y dilatarse con los frecuentes cambios de humedad forman agregados muy pequeños y resistentes. En Entre Ríos se los encuentra especialmente en el centro-sur, sudeste, centro-este, nordeste y noroeste de la provincia (Tasi, 2009).

Desde el punto de vista de la provisión de nutrientes son suelos con una alta capacidad de intercambio catiónico, 30-45 meq/100g, con una saturación de bases superior al 80 % dominada por el calcio. Presentan bajos contenidos de fósforo total (300 ppm), con el 60 al 70 % en la fracción orgánica (De Battista, 2004) y también bajos niveles de P disponible. La provisión de nitrógeno a las plantas depende del contenido de materia orgánica. Sin embargo, más allá de los requerimientos de nutrientes, el contenido de arcillas expansibles que contienen pueden llegar a presentar periodos de contracción y expansión, agrietamientos, entre otros procesos los cuales se presentan como limitantes físicas para el adecuado crecimiento de las raíces (Tasi, 2009).

Las características vérticas propias de este tipo de suelos, les permiten almacenar considerables volúmenes de agua, aunque el rango aprovechable es muy acotado. Sumado a ello los suelos presentan problemas de aireación, resistencia a la penetración y escasa profundidad efectiva de enraizamiento que pueden alcanzar los cultivos. Estos suelos son susceptibles a la compactación y amasado del suelo, en particular cuando las operaciones de campo son realizadas con altos contenidos hídricos. Son suelos que pueden resultar susceptibles a la erosión y al escurrimiento debido a las bajas tasas de infiltración y de conductividad hidráulica que presentan. En síntesis, son suelos que de

acuerdo a sus componentes originarios presentan variabilidad temporal, lo cual condiciona las propiedades físicas (Wilson y Cerana, 2004).

Además de los Vertisoles, es importante mencionar que las plantaciones de *Eucalyptus grandis* también son realizadas sobre suelos arenosos ubicados en las terrazas del río Uruguay. Estos pueden ser arenosos rojizos y suelos arenosos sobre sedimentos aluviales antiguos, con características arcillosas. Los mismos se disponen en una franja irregular, paralela a la costa del río, en un ancho que varía aproximadamente de 2 a 30 km (Tasi, 2009).

Los suelos arenosos rojizos son profundos, con textura arenosa a areno-franca, sin distinción de horizontes, y cuando se observan es muy leve. A veces poseen un horizonte superficial rojizo y algo más oscuro. Tienen 5-12% de arcilla, parte de la cual corresponde a sesquióxidos; un contenido de materia orgánica que no supera el 0,5-0,6%; una capacidad de intercambio catiónico de 1-3 meq/100g de muestra y una saturación de bases de 30-50%. Como consecuencia del tipo de textura predominante en ellos son suelos con muy bajo nivel de fertilidad química, muy permeables y con baja retención hídrica, pudiendo afectar así el crecimiento del *Eucalyptus*. La aptitud de los suelos arenosos rojizos depende principalmente de la profundidad a la que aparecen los sedimentos más arcillosos (Tasi, 2009).

1.1.4. Crecimiento de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden y su relación con el tipo de suelo

El *Eucalyptus grandis* es originario de Australia, sus mejores crecimientos se registran en suelos francos profundos y húmedos, bien drenados de origen volcánico o aluvial. Esta especie crece moderadamente bien en suelos arcillosos si éstos tienen buen drenaje (Aguerre et al., 1995).

Los rendimientos de *Eucalyptus grandis* pueden ser muy variables de acuerdo con las condiciones de clima y suelos del sitio de plantación, del manejo implementado para la misma y de la procedencia del material de propagación. Así lo indican Vallejo y Zapata (2018), quienes mencionan que en sitios de buena calidad para el crecimiento de la especie se reportan rendimientos que oscilan de 30 a 55 m³/ha/año. Investigaciones realizadas por estos autores indican que, en Zimbabue, se han registrado para plantaciones bajo riego, incrementos de cerca de 40 m³/ha/año, incrementos de 17-45 m³ en buenos sitios en Uganda y de hasta 35 m³ en Sudáfrica. En países de Sur América como Brasil se han registrado rendimientos anuales de 25 a 110 m³/ha/año, este último, uno de los mayores registrados para la especie en el mundo. En el caso de Argentina, en la provincia de Misiones, los mismos autores encontraron que un rodal de 14 años ubicado sobre suelos rojos, profundos, arcillosos, registró un rendimiento de 50 m³/ha/año. En España, en una zona con suelos arcillo-arenosos, se han registrado rendimientos superiores a los 10 m³/ha/año. En sitios de calidad media o baja, Vallejo y Zapata (2018), indican que normalmente se pueden esperar rendimientos de 7 a 30 m³/ha/año. En Colombia los rendimientos normales varían entre los 24 a 38 m³/ha/año, pero con programas de mejoramiento se han obtenido rendimientos de hasta 60 m³/ha/año, además de un material más homogéneo en sus características.

La región de Gualguaychú presenta dos ambientes diferenciados, el “continental” ocupando la mayor superficie de terreno y el “predelta” en la región sur. La zona continental está compuesta por un paquete sedimentario pampeano, que da lugar a una peniplanicie. Presenta suelos bien drenados y profundos, predominando los vertisoles y Argiudoles vérticos o ácuicos, con epipedón mólico y un horizonte argílico grueso que se encuentra por debajo. En esta región también se presentan áreas en donde se depositaron materiales eólicos más gruesos en donde pueden reconocerse suelos

Hapludoles con un menor desarrollo edáfico. En los sectores fluviales dominan los Hapludoles, Haplacuentes y Haplacueptes, en el sector deltaico los acuentes y fluventes. En zonas en donde antes existían ambiente marinos se observan Psamentes en cordones litorales y dunas y en las zonas de planicies se encuentran Argiacuoles, Natracualfes y Acuentes (Paparotti & Gvozdenovich, 2007). Las forestaciones con *Eucalyptus grandis* se encuentran ampliamente distribuidas tanto en los suelos arenosos (Entisoles), los arenosos pardos (inceptisoles y molisoles) y los suelos arcillosos (Vertisoles), encontrándose mayores rendimientos en los suelos arenosos pardos (Dalla Tea, 1995; Tasi et al., 2012)

1.1.5. Producción forestal y manejo silvicultural de la especie

En ecosistemas naturales boscosos, las especies forestales son capaces de adaptarse a las condiciones limitantes que puedan darse, esto no implica una disminución inevitable de la productividad, porque las especies nutricionalmente más eficientes pueden aumentar su dominio. Por el contrario, las plantaciones forestales suelen ser monoespecíficas y su productividad cambia directamente en respuesta a las condiciones ambientales. Grandes áreas de plantaciones de *Eucalyptus* se han establecido en varias regiones del mundo durante las últimas décadas, y la expansión de las zonas plantadas continúa. Esta expansión ha sido acompañada por la investigación y la adopción de manejos silviculturales que modifican el ambiente y maximizan las tasas de crecimiento y, en cierta medida, la calidad de la madera (Gonçalves et al., 2004).

Las actividades ligadas al manejo forestal pueden producir un impacto directo sobre los componentes del medio ambiente como lo es el suelo. Con el fin de prevenir o minimizar estos impactos, se hace necesario llevar a cabo prácticas forestales que conduzcan hacia una mayor sustentabilidad en el manejo forestal. La producción forestal realizada sobre un suelo arenoso, puede mejorarse al aplicar manejos

silviculturales apropiados para contrarrestar el desequilibrio nutricional que genera en el suelo la remoción de nutrientes que se da durante el periodo de cosecha de la plantación. De igual forma se puede ver afectada la producción forestal realizada sobre suelos con un alto contenido de arcillas, en lo relacionado a la fertilidad física del mismo, ya que la implementación de ciertas prácticas silviculturales mecanizadas puede llegar a compactar y afectar la profundidad efectiva para el desarrollo radicular de las plantas, por lo que se hace necesario emplear medidas de manejo y conservación que ayuden a mantener la productividad del suelo.

1.2. Objetivo General

El objetivo general de esta tesis fue el de estudiar la respuesta productiva de *Eucalyptus grandis* cuando fueron establecidos distintos manejos en suelos con características contrastantes.

Los objetivos específicos para esta investigación, y considerados como objetivos generales en cada capítulo del estudio, son los siguientes:

- Evaluar el efecto residual de diferentes técnicas de preparación del terreno para plantación sobre, el estado físico del suelo y sobre el crecimiento y desarrollo de *Eucalyptus grandis*.
- Determinar la respuesta de *Eucalyptus grandis* a la fertilización de diferentes nutrientes, sus combinaciones y dosis.
- Estudiar en condiciones controladas el rol de la adición de K como estrategia para la tolerancia de estrés hídrico en plantines de *Eucalyptus grandis*.

1.3. Descripción del Área de Estudio

1.3.1. Ubicación Geográfica, características climáticas y edáficas de la zona bajo estudio

Este trabajo se llevó a cabo en dos lotes del campo El Potrero de San Lorenzo (Figura 1.1.) ubicado en el departamento de Gualeguaychú, al sudeste de la provincia de Entre Ríos (latitud -32.9833; longitud: -58.3093). La precipitación promedio anual supera los 1.000 mm. El clima es cálido y templado. El clima según Köppen se clasifica como Subtropical húmedo (Cfa). La temperatura media anual es 17,7 °C. En cuanto a las características fitogeográficas de la zona, Cabrera A. desde 1971 indicaba que en estas zonas predominaban las selvas en galería, desarrollándose en ellas distintos estratos que tienen diversos componentes vegetales como epífitas, lianas, cañas, helechos arborescentes, palmeras y árboles que oscilan entre los 20 y 30 metros de altura, como es el caso del laurel negro, palmito, entre otros. Sin embargo, en los últimos años, el cambio en los patrones de uso de la tierra tomó gran auge en la región, aumentando la presencia de plantaciones forestales utilizadas para la producción de madera, celulosa y biomasa, debido a las políticas favorables de promoción de estas producciones. Por lo que se dio un cambio importante en la vegetación que existía previamente en la zona.

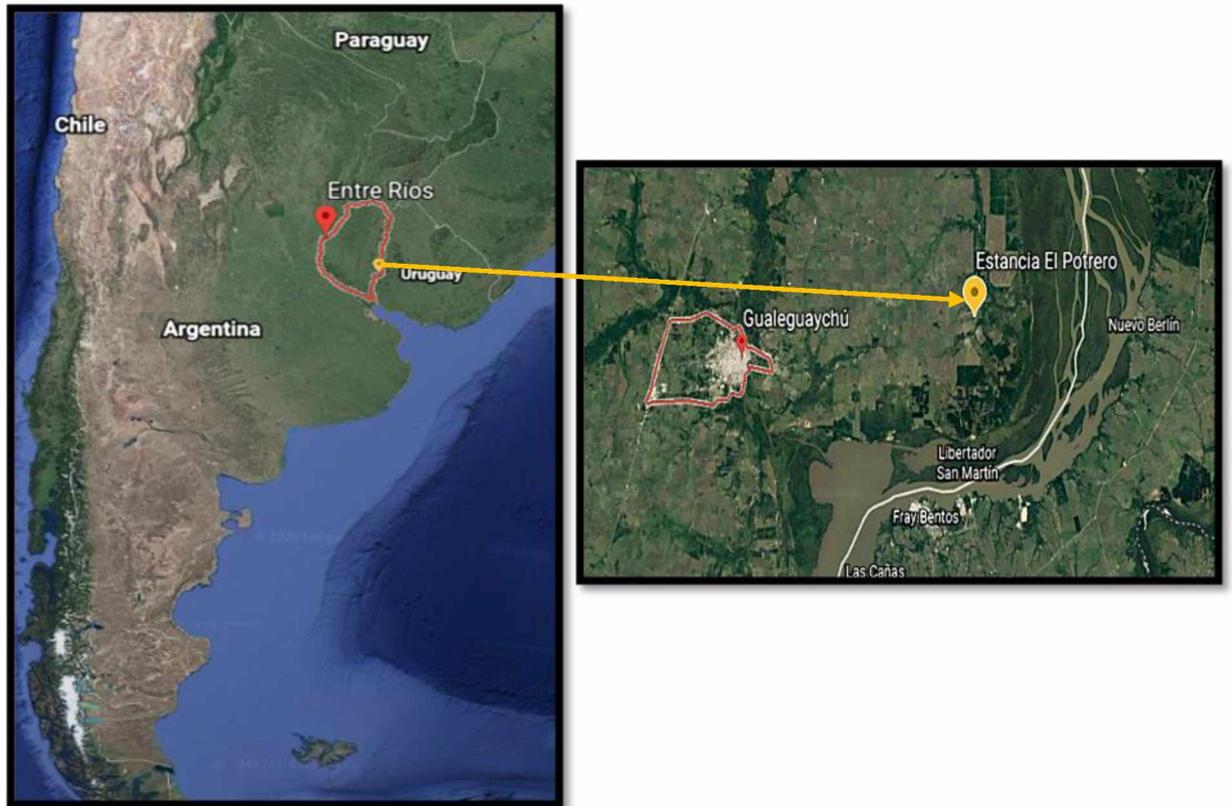


Figura 1.1. Ubicación del área de estudio.

El campo El Potrero abarca una superficie total de 30 mil hectáreas en Entre Ríos, las cuales están dedicadas principalmente a la ganadería, agricultura, apicultura y en particular a la producción de rollos de *Eucalyptus*.

La selección del sitio se debe a que la provincia de Entre Ríos es reconocida como una de las zonas de producción forestal más importantes del país, principalmente en la forestación de *Eucalyptus grandis*, la cual se concentra sobre las terrazas del Río Uruguay (Flores, 2016).

1.3.2. Selección del Área Experimental

Dentro del establecimiento se seleccionaron dos lotes, un lote de suelo arcilloso y un lote de suelo arenoso. En el lote de suelo arcilloso se evaluó la implementación de tres manejos diferentes, de preparación del suelo y su impacto sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis* (Capítulo 2). Por otro lado, en el lote del suelo arenoso se implementaron distintas dosis de fertilizante, con el objetivo de evaluar los efectos generados sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis* (Capítulo 3). Finalmente, y a partir de los resultados obtenidos en el ensayo de fertilización del suelo arenoso, se realizó un ensayo en invernáculo. En dicho ensayo se evaluó la aplicación de diversas dosis de potasio, como una práctica de manejo que contribuyera a una mejor performance de los plantines de *Eucalyptus grandis* en situaciones de estrés hídrico que pueden presentarse en los suelos arenosos (Capítulo 4).

1.3.3. Suelos arcillosos

El suelo sobre el cual se desarrolla el ensayo evaluado en el capítulo 2 (campo Las Mercedes en el lote 27) pertenece a la familia "fina, montmorillonítica, térmica" de los Peludertes argiudólicos de la serie "Estancia Potreros". Son suelos profundos, arcillosos, con buen desarrollo del epipedón, presencia de micro relieve gilgai y arena, con material fino y grueso, en todo el perfil. Están moderadamente bien drenados y moderadamente erosionados (GeoINTA, 2014).

El perfil modal se presenta a continuación:

A11: 00-11 cm; pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; franco-arcillo-limoso; estructura granular y en bloques subangulares medios, moderados; duro en seco, firme

en húmedo; barnices ("humic skins") comunes; moteados de hierro-manganeso escasos, finos y precisos; límite claro, suave.

A12: 11-24 cm; negro (10YR 2/1) en húmedo; franco-arcillo-limoso; estructura en bloques angulares irregulares medios, moderados; duro en seco; firme en húmedo; barnices ("humic skins") abundantes; moteados de hierro-manganeso escasos, finos y precisos; límite claro, suave.

B21t: 24-50 cm; negro (10YR 2,5/1) en húmedo; arcillo-limoso; estructura en prismas compuestos, irregulares, de tamaño medio, débiles, que rompen en bloques angulares irregulares medios, moderados; duro en seco, firme en húmedo; caras de fricción ("slickensides") abundantes, finas; moteados de hierro-manganeso escasos, finos y débiles; límite gradual, suave.

B22t: 50-90 cm; gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; arcillo-limoso; estructura en prismas compuestos irregulares medios, moderados que rompen en bloques cuneiformes medios, fuertes; muy duro en seco, firme en húmedo; caras de fricción ("slickensides") abundantes, gruesa e interceptadas; escasos carbonatos libres en la masa; moteados de hierro-manganeso escasos, finos y débiles; límite gradual, suave.

B3ca: 90-110 cm; gris muy oscuro (10YR 3/1) en húmedo; arcilloso; estructura en prismas compuestos irregulares medios, moderados que rompen en bloques angulares irregulares y cuneiformes, medios, moderado duro en seco, firme en húmedo; barnices ("clay skins") comunes; caras de fricción ("slickensides") abundantes, gruesas; concreciones calcáreas escasas, finas; abundantes carbonatos libres en la masa; moteados de hierro-manganeso escasos, finos y precisos; límite difuso, suave.

Cca: 110 cm +; pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo; arcilloso; estructura en bloques angulares irregulares y cuneiformes, medios, débiles; duro en seco, firme en húmedo; caras de fricción ("slickensides") comunes; concreciones calcáreas abundantes;

abundantes carbonatos libres en la masa; moteados de hierro-manganeso comunes, medios y precisos. (GeoINTA, 2014).

1.3.4. Suelos arenosos

El suelo sobre el cual se centran el capítulo 3 y el capítulo 4 de este proyecto, pertenece a la familia "arenosa, no ácida, térmica" de los Udifluventes óxicos, serie "Puerto Unzue" (campo victoria ii c23). Suelos arenosos a franco arenosos, sobre materiales arcillo-arenosos con colores rojizos a pardo-rojizos, a 65-90 cm de profundidad, con presencia de algunos cantos rodados (Cartas de suelo de Entre Ríos). Los materiales originarios de estos suelos incluyen texturas medias y principalmente franco-arenosas, provenientes del retrabajo de arenas fluviales. Presentan baja CIC ($1,55 \text{ cmolkg}^{-1}$), bajo contenido de materia orgánica (0.79%), de textura arenosa y estructura de grano suelto (Pereyra et al., 2004).

El perfil modal se presenta a continuación:

I: 00-40 cm; pardo amarillento oscuro (10YR 4/6) en húmedo; arenoso; grano simple; suelto; límite abrupto, suave.

II: 40-63 cm; pardo muy oscuro (10YR 2/2) en húmedo; franco-arenoso; masivo; muy duro en seco; muy firme en húmedo; límite gradual, suave.

III: 63-100 cm; pardo rojizo oscuro (2,5YR 4/6) en húmedo; franco-arenoso; masivo; muy duro en seco, muy firme en húmedo; moteados de hierro-manganeso abundantes, gruesos, sobresalientes; límite gradual, ondulado.

IV: 100 cm +; rojo oscuro (2.5YR 3/6) en húmedo; franco-arenoso; masivo; muy duro en seco; muy firme en húmedo; moteados de hierro abundantes, gruesos y sobresalientes (GeoINTA, 2014).

2. Capítulo

**Evaluación del estado hidrofísico residual del
suelo bajo diferentes sistemas de preparación
del suelo y su efecto sobre el crecimiento de
Eucalyptus grandis Hill Ex Maiden**

2.1. Introducción

La productividad de los cultivos a largo plazo puede ser influenciada positiva o negativamente por las operaciones de manejo del sitio en cualquiera de las etapas durante el crecimiento y desarrollo del rodal. Existen distintas formas de manejo que pueden contribuir con el aumento de la productividad, como son el mejoramiento genético, el control de la competencia, el aumento de la disponibilidad de los recursos del sitio (agua, nutrientes), entre otros. Una buena disponibilidad de agua y nutrientes puede lograrse mediante una adecuada preparación del suelo para la plantación.

En particular, una adecuada preparación del suelo puede conllevar a un buen establecimiento en la plantación forestal, además de aumentar los rendimientos y la productividad, lo cual ha sido bien reportado en la bibliografía (Chaves y Fonseca, 1991; Rodríguez y Cerr, 2005; Ferrándiz et al., 2006; Navarro Cerrillo et al., 2006; Britos y Leguizamón, 2013). Sin embargo, hay una variación considerable en los efectos de las técnicas empleadas sobre diferentes especies y sitios (Varelides y Kritikos, 1995). Numerosos autores indican que la realización de labores para la preparación de suelos de texturas medias y finas es un procedimiento habitual previo a la plantación forestal, destinado a favorecer el prendimiento del plantín, la supervivencia y el crecimiento de las plántulas (Querejeta et al., 2001; Karlsson, 2002; Ceacero et al., 2012; Löf et al., 2012). Además, la preparación en estos tipos de suelos contribuye a mejorar la aireación del suelo, el acceso a nutrientes y la disponibilidad hídrica durante las primeras etapas del establecimiento y desarrollo de la planta (Nambiar, 1993). Evidencia de los beneficios de preparar los suelos antes de iniciar una plantación forestal han sido documentados por diversas/os autoras/es (Rubilar et al.,

2008; du Toit et al., 2008; von Wallis, 2013; Albaugh et al., 2015; López, 2015; Palacios Rodríguez, 2015) y muchos de estos efectos están relacionados con la reducción de la resistencia del suelo, es decir, a un suelo suelto o “loosening” (Gonçalves et al., 2004).

La elección del método de preparación del suelo a utilizar dependerá del tipo de suelo, la topografía y el tipo y grado de impedancia que tenga el sitio y que sea necesario adecuar para su uso y conservación (Löf et al., 2012). De la misma forma la respuesta obtenida dependerá del manejo realizado, del implemento aplicado y de las características del sitio. La elección correcta del tratamiento para la preparación de un sitio es muy importante para lograr un óptimo desarrollo y rápido crecimiento durante la fase del cierre de copas (Larocca et al., 2004).

Larocca (2004) menciona que la productividad está fuertemente determinada por las labores que se realizan en la etapa de establecimiento de la plantación. Los suelos que presentan características vérticas relacionadas al tipo de arcillas dominantes y al régimen hídrico, acompañado de ciclos de expansión-contracción presentan una variabilidad temporal en sus propiedades físicas, las cuales dificultan la aplicación de métodos de laboreo, su estimación y aprovechamiento (Cerana et al., 2005).

Durante los últimos años se han implementado diversas técnicas que contribuyen a mejorar las condiciones físicas del suelo, las cuales pueden impedir un correcto desarrollo de las especies forestales. Estas técnicas han sido aplicadas en distintas partes del mundo (Rubilar et al., 2008; du Toit et al., 2010; Löf et al., 2012; Palacios Rodríguez, 2015) tanto como en la Argentina (Aparicio et al., 2005; Fernández et al., 2003; López, 2011; López, 2015). Tal es el caso del uso del *subsulado*, el cual tiene por objeto reducir la compactación o altas densidades de algunos tipos de suelo para facilitar el desarrollo radicular. El *subsulado* reduce la densidad del suelo y aumenta la

porosidad de los horizontes del subsuelo, aflojando o soltando suelos compactados, con alto contenido de arcillas, entre otros, facilitando el desarrollo radicular y la velocidad de infiltración (Ibañez et al., 2004). El aflojamiento generado en el suelo tiene mayor efecto a medida que aumenta el porcentaje de arcilla, esto se debe a la mayor resistencia a la cual se enfrenta el crecimiento radical y a la menor permeabilidad del agua en esos suelos (Larocca et al., 2004). Es importante mencionar que este acondicionamiento mecánico puede ser fácilmente reversible, debido a que no se encuentra estabilizado.

Otra forma de preparación del suelo es la realización de *camellones*, lo que permite generar un volumen de suelo sobre el nivel original del terreno y propiciar un ambiente con mayor aireación para las raíces. Además, la formación de *camellones* permite concentrar la materia orgánica y los nutrientes en la línea de plantación. En suelos arcillosos también se logra mejorar el volumen de macroporos y reducir la densidad del suelo. En aquellos suelos más bajos, con exceso de humedad, la preparación del terreno con *camellones* es una práctica de gran utilidad. La elevación del suelo aumenta el volumen de tierra libre de agua para el desarrollo del sistema de raíces, con un efecto positivo en el crecimiento (Dalla Tea y Larocca, 1998; 2004).

Dada la importancia de la implementación de diversas prácticas agronómicas que contribuyan a disminuir las limitaciones naturales del suelo, es necesario también conocer la perdurabilidad de las mismas en la zona en donde sean establecidas. En este sentido, poco ha sido investigado sobre si se mantienen los efectos benéficos de la práctica de camellón. En el caso de la aplicación del subsolado en el suelo, se ha encontrado que los efectos residuales de su aplicación no perduran por mucho tiempo en suelos franco limosos y franco arcillo limosos (Alvarez et al., 2009; Vallejos et al., 2014), lo que nos lleva a evaluar este aspecto en el ensayo establecido y determinar si

aún son evidentes los efectos generados por la aplicación del tratamiento mecánico, o si no existen efectos residuales producto del paso del subsolado.

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Evaluar el efecto residual de diferentes técnicas de preparación del terreno para plantación sobre, el estado físico del suelo y sobre el crecimiento y desarrollo de *Eucalyptus grandis*.

2.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el estado hidrofísico del suelo, luego de 2 años y medio, de aplicadas diferentes preparaciones de suelo para la plantación de *Eucalyptus grandis* (subsolado, camellón y subsolado más camellón).
- Estudiar el efecto de las diferentes preparaciones del suelo sobre el desarrollo radical y variables dasométricas de *Eucalyptus grandis*.

2.3. Hipótesis

La preparación de un suelo arcilloso para la plantación de *Eucalyptus* basado en el subsolado más camellón, generará mejores condiciones hidrofísicas respecto al subsolado y al camellón únicamente, proporcionando ventajas en el establecimiento temprano de plantaciones de *Eucalyptus grandis*, que se observan en mejor performance a través de las variables dasométricas y en un mayor desarrollo radicular.

2.4. Materiales y Métodos

2.4.1. Tratamientos y diseño del ensayo

El lote sobre el que se realizó el ensayo proviene de un uso forestal hasta el año 2013, en el que se realizó la cosecha del rodal. En ese año se quemaron los residuos y se aplicaron los tratamientos de preparación de suelo. Previo a la plantación se realizó un control de malezas

En el año 2014, se establecieron los tratamientos de preparación del suelo, en el mes de septiembre. Estos tratamientos consistieron en:

- **Subsolado (S):** elaborado mediante el uso de un cincel o reja y realizado sobre la línea de plantación, hasta una profundidad de 30-40 cm.
- **Camellón (C):** la preparación consiste en dos pasadas de rastra de discos más una pasada de arado para formar un *camellón* de un metro de ancho y de 30 a 40 cm de altura.
- **Camellón + Subsolado (C+S):** resulta de la pasada en primera instancia del cincel o reja y luego se forma el *camellón* utilizando el arado sobre la línea subsolada.

Luego de la preparación del terreno, se realizó la plantación de *Eucalyptus grandis* de origen seminal en forma manual. La plantación se realizó a inicios del mes de octubre 2014, a una densidad de 1333 plantas/ha, una distancia aproximada de 2,5 m entre planta y 3 m entre líneas, sin realizar ninguna fertilización inicial al ensayo. Las mediciones realizadas en el suelo y sobre la plantación, se efectuaron en el año 2017.

Los tratamientos estaban dispuestos en un diseño en franjas, de 8 líneas, siendo dos líneas adicionales a cada lado como bordura entre dos tratamientos. En cada franja se establecieron parcelas de 20 m x 30 m, haciendo un total de 8 parcelas por tratamiento. Cada parcela contó con alrededor de 36 – 48 plantas.

2.4.2. Muestreo y determinaciones realizadas

2.4.2.1. Mediciones forestales en campo

Se realizó la medición de diámetro a la altura del pecho (DAP) de todos los individuos de cada parcela y se calculó el área basal (AB). Se obtuvo el DAP y el AB promedio y el AB total por parcela la cual fue extrapolada a la hectárea. En cada parcela se identificaron 2 árboles de DAP promedio para proceder luego a tomar muestras de suelo en su entorno. Adicionalmente se realizó la medición del diámetro de copas de los árboles midiendo en dos direcciones, dirección Norte-Sur y dirección Este-Oeste, tomando como referencia la proyección de los extremos de ésta sobre el suelo y midiéndose con la cinta métrica la distancia entre extremos.

También se hizo la lectura del número de raíces mediante la realización de una calicata de 1 m de profundidad y 1,80 m de ancho, perpendicular a la línea de plantación y distanciada a 15 cm del árbol (Figura 2.1.). Se seleccionaron 3 distancias del árbol (0 cm, 45 cm, 90 cm), tomadas desde la LP, y se evaluó el número de raíces en los estratos de 0-10 cm y de 10-20 cm. Las raíces fueron expuestas en la pared de lectura para facilitar el recuento, mediante el uso de tallado con cuchillo. El recuento de raíces se realizó por el método de perfil expuesto. En el que la pared de lectura se coloca una malla cuadrada cubriendo todo el perfil, siendo cada cuadrícula de 10 cm x 10 cm (Kolesnikov, 1971). Se cuantificaron todas las raíces visibles, identificando al mismo tiempo los tamaños de acuerdo con una clasificación establecida por la observadora. Los tres tamaños de raíces clasificados fueron: raíces finas (tamaños <0,14mm), raíces de tamaño medio (0,14–0,37 mm) y raíces gruesas (>0,37 mm). Esta lectura de raíces permitió evaluar mejor los aportes de cada una de las prácticas de labranza en el suelo y su influencia sobre el crecimiento radical en relación a la exploración de raíces.



Figura 2.1. Lectura de raíces en el perfil del suelo.

2.4.2.2. Mediciones de laboratorio en el suelo

Las muestras de suelo se tomaron sobre la línea de plantación y en el entre surco en torno a los dos árboles seleccionados por su DAP promedio. Por un lado, se colectaron muestras de suelo estratificadas cada 5 cm, hasta los 20 cm de profundidad, obteniendo de esta forma 4 estratos (0-5 cm; 5-10 cm; 10-15 cm; 15-20 cm).

Análisis de fertilidad: Las muestras de suelo se utilizaron para determinar el pH, el contenido de materia orgánica (MO), cationes intercambiables y, la distribución del tamaño de las partículas del suelo (DTP). El pH (1:2,5 sólido: agua) se obtuvo a través de una medición mediante potenciómetro. Se determinó el contenido de materia orgánica por el método de Walkley y Black (1934). La DTP fue evaluada utilizando el método de Bouyoucos. Se evaluó la densidad real del suelo (D_r) con muestras tomadas de 0-20 cm. El análisis se realizó mediante el método del picnómetro con kerosene.

Se determinó la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) en el laboratorio. Para ello se tomaron 4 muestras de suelo por parcela, con cilindros de hierro de 7 cm de altura y 6 cm de diámetro, las cuales fueron saturadas para luego ser sometidas a una carga

variable de agua, midiendo la lámina de agua que pasa por la columna de suelo saturada en un tiempo determinado (Klute y Dirksen, 1986).

Constantes hídricas: Se evaluó el contenido de agua del suelo a -33 (capacidad de campo, CC) y -1500 kPa (punto de marchitez permanente, PMP) tomando muestras de suelo de 0-20 cm de profundidad. Se utilizó olla y membrana de presión para su determinación.

Estabilidad estructural: En muestras de 0-20 cm se analizó el contenido de agua del suelo, a partir de monolitos (2 por individuo: uno sobre la línea de plantación (LP) y otro sobre el entre surco (ES)) obtenidos hasta los 20 cm de profundidad, por parcela, por tratamiento, haciendo un total de 48 monolitos de suelo, se realizó el análisis de estabilidad estructural (EE) a partir de la metodología de Le Bissonnais (1996). Se pesaron entre 5-6 g de agregados de 3-5 mm de tamaño, para la medición de la EE y, la porosidad de agregados (P_{agreg}). Luego se sometieron a tres pretratamientos de laboratorio, estos fueron: 1-humectación rápida por inmersión en agua o efecto estallido (T1), 2-desagregación mecánica por agitación después de la re-humectación con etanol (T2), 3-humectación lenta con agua por capilaridad (T3) y el promedio de los tres pretratamientos (EE). Posteriormente se tamizó, con movimiento helicoidal, y utilizando un tamiz de $50 \mu\text{m}$, la fracción $> 50 \mu\text{m}$ retenida en los tamices y resultante de cada pretratamiento se secó en estufa y posteriormente se tamizó en una columna de tamices para evaluar la distribución de agregados para los tamaños de $>2000 \mu\text{m}$, $2000-1000 \mu\text{m}$, $1000-500 \mu\text{m}$, $500-200 \mu\text{m}$, $200-100 \mu\text{m}$ y $100-50 \mu\text{m}$. Para calcular el diámetro medio ponderado de cada tratamiento se realizó la suma algebraica de las masas de las fracciones remanentes de cada tamiz, multiplicado por la apertura de los tamices adyacentes, como se muestra en la Ecuación 1.

$$DMP = \sum [Diámetros\ medios\ entre\ dos\ tamices\ (mm)] * [\% \text{ de partículas retenidas sobre el tamiz}] / 100 \quad [\text{Ec. 1}]$$

Se determinó el índice de repelencia de 15 agregados, de entre 3-5 mm de diámetro. Para ello se realizó la determinación del valor de sortividad (Sort) tanto en agua destilada, como en etanol (Hallett y Young, 1999).

La porosidad de los agregados (P_{agreg}) fue determinada siguiendo el principio de Arquímedes en kerosene (Stengel, 1979). Para ello se pesaron entre 3 a 4 gramos de agregados, de entre 3-5 mm y secados al aire. Estos agregados se dejaron una noche sumergidos en kerosene. Se registró el peso de los agregados con kerosene y posteriormente se secaron a 105 °C durante 24 horas para luego registrar su peso seco. De esta forma se obtuvo el peso y volumen de los agregados, con estos datos se pudo determinar su densidad aparente y su porosidad.

2.4.2.3. Mediciones de campo en suelos

A campo se muestreó la densidad aparente (DA) y la resistencia a la penetración (RP). La conductividad hidráulica saturada fue determinada en laboratorio. La DA fue evaluada en muestras de suelo tomadas en forma superficial (0-5 cm), para ello se empleó el método del cilindro, en donde se utilizó un cilindro de 5 cm de altura y de 5 cm de diámetro (Klute, 1986). Con los resultados de la DA y la D_r se pudo obtener la porosidad total del suelo (PT) mediante la siguiente Ecuación 2:

$$PT = \frac{D_r - D_a}{D_r} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Se midió la TI con un permeámetro de disco. Se registraron las mediciones hasta que la tasa de infiltración fue constante. Posteriormente, aplicando la ecuación que se

describe en Lin et al., (1996), se determinó la conductividad hidráulica saturada a campo (K_{sat} a campo). En el caso de la evaluación de la K_{sat} a campo se realizaron dos mediciones en la LP y otras dos en el ES de cada parcela.

Resistencia a la penetración (RP): Para la determinación de la RP del suelo se utilizó un penetrómetro de golpe (punta de ángulo de 60°, modelo INTA Villegas). Se muestreó siguiendo una transecta perpendicular a la línea de plantación midiendo cada 15 cm de distancia de cada lado respecto del árbol, hasta los 90 cm de cada lado y una medición central frente al árbol (Figura 2.2.). La profundidad de medición se estableció hasta los 20 cm tanto de RP como el contenido hídrico del suelo. La RP fue corregida por el contenido hídrico encontrado a campo. El contenido hídrico del suelo se determinó a partir de la diferencia de peso (estufa a 105°C durante 48 hs), para los estratos de 0-2,5; 2,5- 5, 5-7,5; 7,5-10; 10 -12,5, 12,5- 15; 15-17,5; 17,5-20 cm.

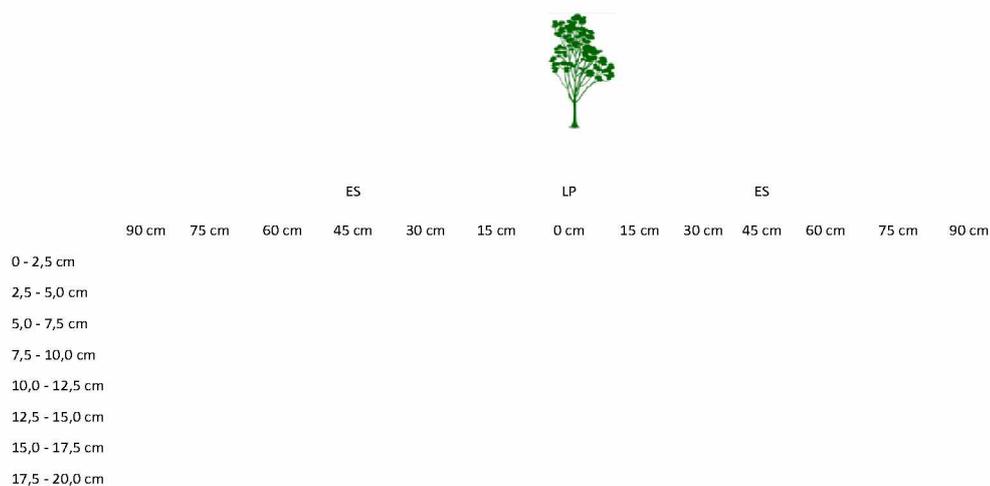


Figura 2.2. Esquema de medición de la resistencia a la penetración (RP). Áreas muestreadas ES (entre surco) y LP (línea de plantación).

2.5. Análisis Estadístico

Previo al análisis de comparación de medias, se verificaron los supuestos y ninguna variable debió ser transformada. Posterior a este análisis las variables medidas fueron evaluadas mediante modelos mixtos (InfoStat), los componentes fijos fueron el tratamiento (camellón (C), subsolado (S) y camellón+subsolado (C+S)) y la posición (línea de plantación: LP y, entre surco: ES), mientras que los componentes aleatorios fueron la parcela y el individuo. Se corrigió la heterocedasticidad de la varianza mediante *varIdent* a partir de la interacción tratamiento x posición. En el análisis fueron testeadas estructuras de covarianza (Littell et al., 1998). También fue utilizado el criterio de Akaike (AIC; Akaike, 1974) en cada una de las variables, para comparar la calidad de cada modelo, detectar las diferencias entre los tratamientos y las posiciones, considerando a su vez las variables aleatorias. Fueron analizados los efectos simples de las interacciones entre los factores. Cuando existieron efectos significativos de los factores fijos, los contrastes fueron realizados mediante el test *LSD* de *Fisher* ($P < 0,05$). También se realizaron correlaciones de Pearson entre las variables medidas.

2.6. Resultados

2.6.1. Caracterización del Suelo

2.6.1.1. Análisis por estratos y entre estratos

El análisis del suelo por estratos nos permitió evaluar los efectos generados por la preparación del suelo y los posibles cambios en las características del suelo y propiedades químicas que pudieran conducir a cambios en las variables físicas e hidrológicas del suelo. En ese sentido se evaluaron el contenido de arena, limo y arcillas del suelo, al igual que el contenido de MO y el nivel de pH encontrados, además de la Dr. Se muestran los datos obtenidos del análisis de estas variables en la Tabla 2.1. También vale decir que de acuerdo a la distribución de tamaños de partículas, la textura de este suelo se clasifica como un suelo franco arcillo arenoso, con un contenido promedio de 52,25% de arena, 27,63% arcilla y 20,12% de limo. Fueron incluidos tanto las muestras ubicadas sobre la LP y el ES, para cada variable evaluada. Sin embargo, los resultados no mostraron diferencias significativas entre las posiciones de toma de muestra para las variables analizadas.

Tabla 2.1. Contenido promedio de arena, limo, arcilla del suelo, materia orgánica (MO), pH, y densidad de partícula (Dr), en cada uno de los estratos: 0-5 cm; 5-10 cm; 10-15 cm; 15-20 cm, para los manejos de preparación del suelo: camellón (C), subsolado (S) y camellón+subsolado (C+S). Entre paréntesis se presenta el error estándar. Letras mayúsculas indican diferencias entre tratamientos y letras minúsculas indican diferencias entre estratos de profundidad.

Variable	Estrato	Tratamientos		
		S	C	C+S
Arena (%)	0-20 cm	51,35 (1,15)	56,5 (2,25)	48,9 (2,57)
Limo (%)	0-20 cm	20,9 (1,48)	15,75 (1,69)	23,7 (1,57)
Arcilla (%)	0-20 cm	27,75 (1,79)	27,75 (1,56)	27,4 (1,20)
MO (%)	0-5 cm	5,32 (0,54) a	4,05 (0,75) a	3,66 (0,52) a
	5-10 cm	3,70 (0,14) b	3,53 (0,47) b	3,43 (0,42) b
	10-15 cm	2,76 (0,27) d	1,94 (0,29) c	2,20 (0,38) d
	15-20 cm	3,35 (0,29) Ac	1,94 (0,49) Cc	2,67 (0,31) Bc
	Promedio	3,78	2,87	2,99
pH	0-5 cm	4,77 (0,15)	4,83 (0,37)	4,72 (0,17)
	5-10 cm	4,77 (0,19)	4,76 (0,21)	4,93 (0,30)
	10-15 cm	4,40 (0,09)	4,39 (0,23)	4,40 (0,34)
	15-20 cm	4,35 (0,0,10)	4,18 (0,23)	4,62 (0,38)
	Promedio	4,57	4,54	4,67
Dr	0-20 cm	2,42 (0,05)	2,31 (0,04)	2,38 (0,12)

En la Tabla 2.1. se presenta los resultados de DTP en las que se observa que para el estrato 0-20 cm para los tratamientos S, C, C+S los valores son similares, en los cuales limo más arcilla representan casi el 50 %. En relación con el contenido de MO, se presentaron diferencias entre estratos en todos los tratamientos. En particular, en el estrato 15-20 cm existieron diferencias entre tratamientos presentando un orden de

mayor a menor de $S > C+S > C$. El pH no presentó diferencias ni entre estratos, ni entre tratamientos. Tampoco Dr presentó diferencias entre tratamientos.

2.6.2. Evaluación de los tratamientos y la posición sobre las propiedades hidrofísicas del suelo.

Los resultados arrojaron que no hubo interacción entre el tratamiento y la posición para ninguna variable (Tabla 2.2.). Para el factor preparación del suelo se encontraron diferencias significativas para la Sort, el test de humedecimiento rápido del suelo (T1), MO 0-10 cm ($P=0,0025$) y de 10-20 cm y el contenido de agua a PMP. La variable PT presentó diferencias significativas para el análisis de la posición en la que fue extraída la muestra (LP o ES).

Tabla 2.2. Evaluación de los tratamientos y la posición sobre las propiedades hidrofísicas del suelo. Muestreo en la línea de plantación (LP) y en el entre surco (ES). Valores colocados presentaron diferencias estadísticas para el test LSD *Fisher* ($P < 0,05$)

Variable	p- value		
	Trat	Posición	Trat*Posición
Sortividad	0,0209	n.s	n.s
Porosidad de Agregados (m^3/m^3)	n.s	n.s	n.s
Humedecimiento Rápido (T1) (mm)	0,0142	n.s	n.s
Agitación Mecánica (T2) (mm)	n.s	n.s	n.s
Humedecimiento Lento (T3) (mm)	n.s	n.s	n.s
Estabilidad Estructural (EE) (mm)	0,0105	n.s	n.s
Conductividad Hidráulica (cm/h)	n.s	n.s	n.s
Porosidad Total (%)	n.s	0,0448	n.s
Densidad Aparente (g/cm^3)	n.s	n.s	n.s
Materia Orgánica 0-10 cm (%)	0,0025	n.s	n.s
Materia Orgánica 10-20 cm (%)	<0,0001	n.s	n.s
Punto de Marchitez Permanente (%)	0,0090	n.s	n.s
Capacidad de Campo (%)	n.s	n.s	n.s

2.6.2.1.Sortividad.

En la Figura 2.3. el análisis de la sortividad del suelo mostró diferencias significativas entre los tratamientos empleados. La preparación del suelo C+S mostró las medias más altas (4,39) seguido de los tratamientos de C (2,8) y el tratamiento de S (2,24), respectivamente.

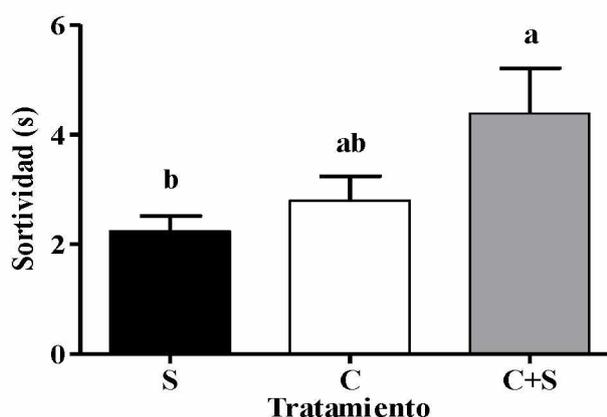


Figura 2.3. Sortividad (Sort) para la preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas para entre tratamiento, con el test de LSD *Fisher* ($P < 0,05$).

2.6.2.2.Test de Humedecimiento Rápido y Estabilidad Estructural

El T1 evaluado en los agregados del suelo (Figura 2.4.) presentó diferencias significativas entre las preparaciones de suelo evaluadas. No se encontraron diferencias significativas en los pretratamientos T2 y T3. Los tratamientos C+S y C presentaron los valores más altos y S (0,78 mm) el más bajo, difiriendo de los otros tratamientos.

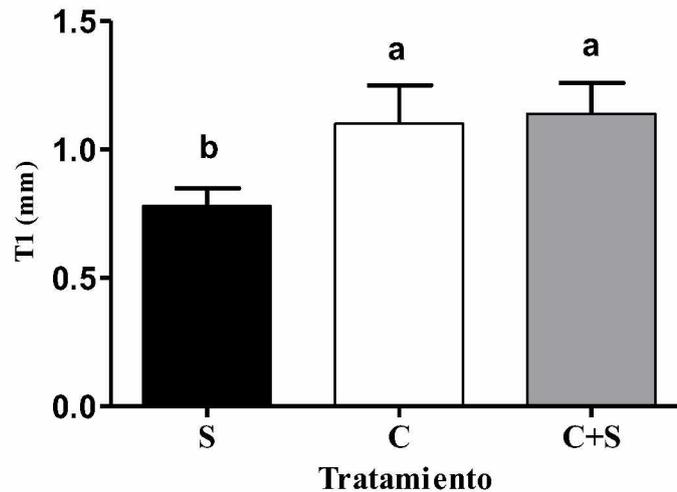


Figura 2.4. Test de humedecimiento rápido del suelo (T1) para los manejos de preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

El promedio de los 3 pretratamientos utilizados para determinar la EE también nos muestra diferencias significativas entre las preparaciones de suelo evaluadas (Figura 2.5.), siendo el tratamiento de S el que presentó los valores más bajos (1,55 mm) y los tratamientos C y C+S, respectivamente, presentaron los valores más altos (1,71 mm; 1,78 mm). De acuerdo a estos resultados y al criterio de clasificación del grado de estabilidad, propuesto por Le Bissonnais (1996), los tratamientos se encuentran en la categoría “estable”.

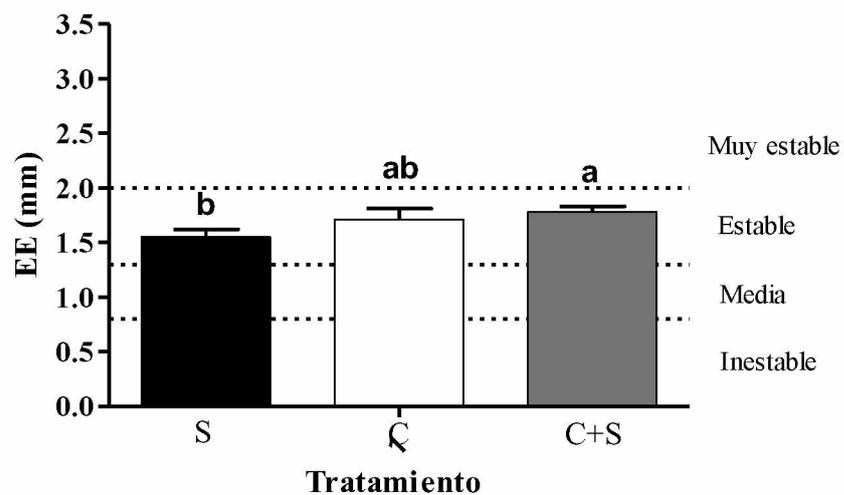


Figura 2.5. Estabilidad Estructural del suelo (EE), para los manejos de preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, con el test de LSD *Fisher* ($P < 0,05$).

2.6.2.3. Contenido de Materia Orgánica del Suelo

En la Figura 2.6. se muestra la concentración de MO para los estratos de 0-10 cm y de 10-20 cm. Se observó que para ambos estratos el tratamiento de S presentó el mayor porcentaje de MO 0-10 (4,51%) y MO 10-20 (3,06%). El tratamiento de C+S obtuvo valores menores tanto para el contenido de MO de 0-10 cm y de 10-20 cm de profundidad (3,55 % y 2,44 %, respectivamente). Finalmente, el tratamiento de C (MO 0-10cm= 3,94 % y MO 10-20cm= 1,98 %) presentó los menores valores.

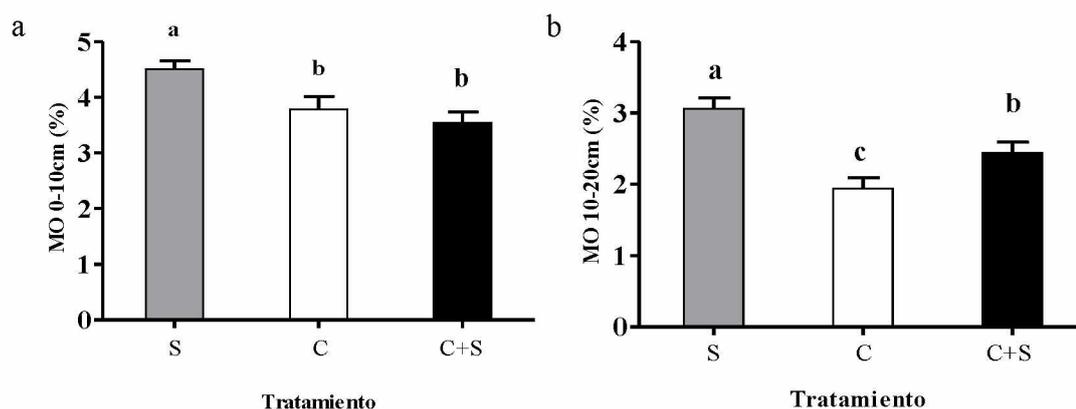


Figura 2.6. (a) Contenido de materia orgánica (%) para el estrato 0-10 cm (MO 0-10). (b) Contenido de materia orgánica (%) para el estrato 10-20 cm (MO 10-20 cm), para la preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas para entre tratamientos, con el test de LSD *Fisher* ($P < 0,05$).

2.6.2.4. Contenido hídrico en Punto de Marchitez Permanente

En la Figura 2.7. se presenta el contenido hídrico en PMP. Las medias obtenidas mostraron que el tratamiento con los mayores valores fue el S (14,22 %) al igual que el tratamiento de C+S (13,39 %), el tratamiento de C presentó los menores valores (12,37 %).

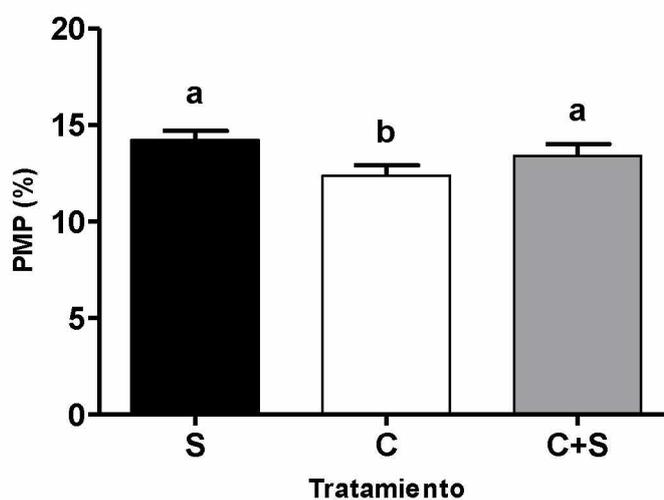


Figura 2.7. Contenido de hídrico en Punto de Marchitez Permanente (PMP, %) para la preparación de suelo: S (Subsolado), C (Camellón) y C+S (Camellón + Subsolado). Letras distintas indican diferencias significativas para entre tratamientos, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

2.6.2.5. Porosidad Total del Suelo

En la Figura 2.8. se muestra la PT del suelo presentando diferencias significativas en las posiciones sobre las cuales fueron realizados los muestreos. Para la línea de plantación (LP) se obtuvo una media de PT igual a 45,88 % siendo esta la mayor entre ambas posiciones y en el entre surco (ES) se obtuvo una media de PT igual a 40,26 %.

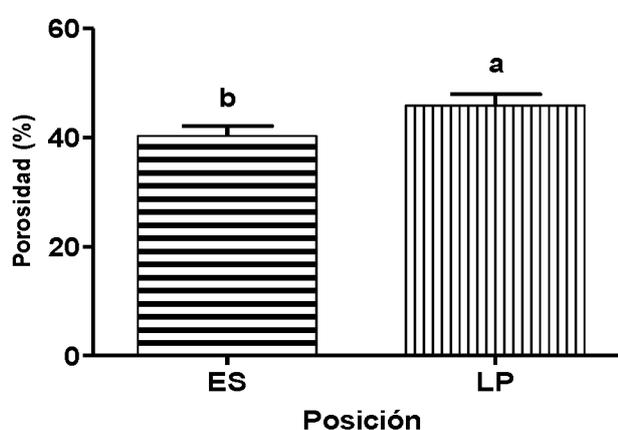


Figura 2.8. Porosidad total del suelo (PT, %) para las posiciones muestreadas ES (entre surco) y LP (línea de plantación). Letras distintas indican diferencias significativas para entre tratamiento, con el test de *LSD Fisher* ($P < 0,05$).

2.6.3. Relación entre las variables edáficas y dasométricas

En la Tabla 2.3. se presentan los coeficientes de la correlación de Pearson entre las variables hidro-físicas y dasométricas evaluadas. La DA se correlacionó negativamente con la PT, PMP, CC, K_{sat} y P_{agreg} . La PT se correlacionó positivamente con Dr, PMP, K_{sat} y Sort.

El PMP también se correlacionó positivamente con CC y la MO (0-10 y 10-20 cm), y negativamente con las variables T1 y AB. Las variables CC, T2 y MO (ambos estratos) se correlacionaron positivamente entre sí. La variable AB se correlacionó negativamente con CC, PMP y los contenidos de MO (ambos estratos). La K_{sat} además se correlacionó positivamente con el contenido de MO en profundidad. En el caso de la variable T1, la correlación positiva se dio con las variables T2, T3, EE, Sort, AB.

Para la variable T2 las correlaciones positivas se dieron con las variables T3 y EE, y en el caso de las variables T3 presentó una correlación positiva con la EE. La Sort presentó una correlación negativa con el contenido de MO evaluada a los 10-20 cm.

La MO, de ambas profundidades, se correlacionó negativamente con ambas variables dasométricas (DAP y AB). A su vez, DAP y AB se correlacionaron positivamente entre sí.

Tabla 2.3. Correlaciones de Pearson entre las variables densidad aparente (DA), densidad real (Dr), porosidad total (PT), contenido de humedad a punto de marchitez permanente (PMP), contenido de humedad a capacidad de campo (CC), conductividad hidráulica saturada (K_{sat}), test de humedecimiento rápido (T1), test de agitación mecánica (T2), test de humedecimiento lento (T3), estabilidad estructural (EE), porosidad de agregados (P_{agreg}), sortividad (Sort), porcentaje de materia orgánica de 0-10 cm de profundidad (MO 0-10 cm) y porcentaje de materia orgánica de 10-20 cm de profundidad (MO 10-20 cm), diámetro promedio a la altura del pecho (DAP), área basal promedio (AB). Muestreo superficial realizado de 0-20 cm en la línea de plantación (LP) y en él entre surco (ES). *** $P < 0,01$ ** $P < 0,05$ * $P < 0,1$.

	DA	Dr	PT	PMP	CC	K_{sat}	T1	T2	T3	EE	P_{agreg}	Sort	MO 0-10cm	MO 10-20cm	DAP	AB
DA	1,00															
Dr		1,00														
PT	-0,90***	0,44**	1,00													
PMP	-0,41***		0,38**	1,00												
CC	-0,26*			0,82***	1,00											
K_{sat}	-0,43**		0,37**			1,00										
T1				-0,27*			1,00									
T2					0,39**		0,48***	1,00								
T3							0,35**	0,28*	1,00							
EE							0,80***	0,74***	0,76***	1,00						
P_{agreg}	-0,04*								0,09*		1,00					
Sort			0,31*				0,32*			0,29*		1,00				
MO 0-10cm				0,47***	0,35**								1,00			
MO 10-20cm				0,32**	0,30**	0,28*						-0,02*		1,00		
DAP													-0,48**	-0,56***	1,00	
AB				-0,44**	-0,38*		0,44**						-0,48**	-0,52**	0,94***	1,00

2.6.4. Efecto de los tratamientos sobre variables dasométricas

En la Figura 2.9. se muestra el DAP para cada tratamiento y el AB estimado en m^2/ha para cada tratamiento (C, S y C+S). Se obtuvo que en el caso del DAP promedio, los tratamientos de C ($7,93 m^2/ha$) y C+S ($7,45 m^2/ha$) presentaron las mayores medias. El tratamiento S ($6,18 m^2/ha$) resultó con el menor valor de DAP. En el caso del AB evaluada los tratamientos de C ($5,94 m^2/ha$) y C+S ($5,14 m^2/ha$) nuevamente obtuvieron los mayores valores, superando al tratamiento de S ($2,90 m^2/ha$).

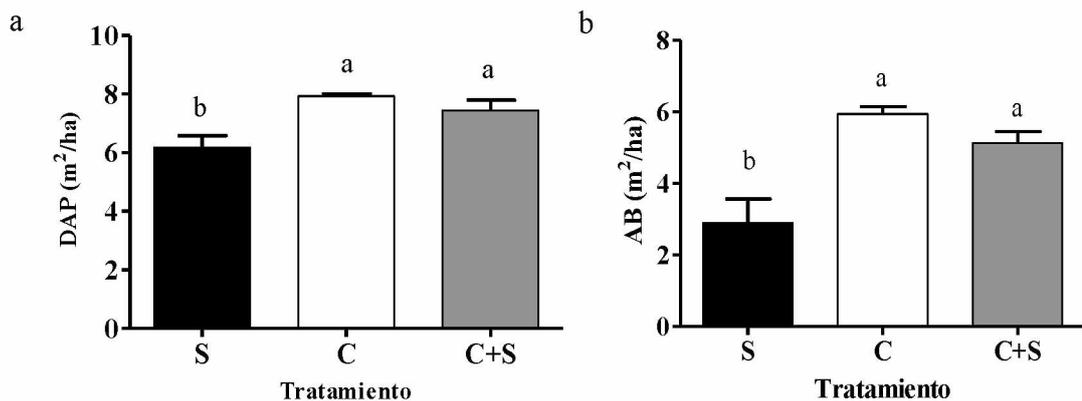


Figura 2.9. (a) Diámetro a la altura del pecho (DAP) y (b) área basal (AB) para diferente preparación del terreno a los 2 años de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas para el test de LSD *Fisher* ($P < 0,05$).

2.6.5. Evaluación del Desarrollo Radicular y la Resistencia a la Penetración del Suelo

2.6.5.1. Presencia de Raíces y Resistencia a la Penetración del Suelo, evaluada entre los distintos tratamientos.

En la Tabla 2.4. se muestran los resultados de la evaluación del número de raíces finas (Rz_{fina}), medias (Rz_{med}) y gruesas (Rz_{grue}), y la RP evaluada en puntos de distancias del árbol.

En el estrato de 0-10 cm se hallaron diferencias en la concentración de Rz_{grue} sobre la LP (0 cm). A los 45 cm de distancia del árbol, la concentración de raíces Rz_{med} muestra diferencias significativas, también para el mismo estrato, siendo mayor la presencia en el tratamiento de C (C= 3,5; C+S= 1,5; S= 1,5).

El estrato de 10-20 cm de profundidad no muestra diferencias en la concentración de raíces finas, medias y gruesas evaluadas tanto en la LP, como a los 45 cm y 90 cm de distancia del árbol. Tampoco se encontraron diferencias significativas cuando fue evaluada la RP.

Tabla 2.4. Análisis de varianza de la resistencia a la penetración (RP) y el número de raíces de acuerdo a la clasificación (raíces finas (Rzfina): < 0,14 mm; raíces medias (Rzmed): 0,14 – 0,37 mm; raíces gruesas (Rzgrue): > 0,37 mm), para los tratamientos camellón (C), subsolado (S), camellón + subsolado (C+S), realizado en la línea de plantación del árbol: 0 cm, y en dirección perpendicular a la línea de plantación: 45 cm y 90 cm del árbol. LSD Fisher (P < 0,05)

Estrato	Variable	P- value		P- value		P- value	
		Tratamiento	Tratamiento	Tratamiento	Tratamiento	Tratamiento	Tratamiento
0-10 cm	RP-0cm	n.s.	RP-45cm	n.s.	RP-90cm	n.s.	
	Rzfina-0cm	n.s.	Rzfina-45cm	n.s.	Rzfina-90cm	n.s.	
	Rzmed-0cm	n.s.	Rzmed-45cm	0,0370	Rzmed-90cm	n.s.	
	Rzgrue-0cm	0,0110	Rzgrue-45cm	(C>C+S=S)	Rzgrue-90cm	n.s.	
	Rztot-0cm	(C+S>C>S)	Rztot-45cm	n.s.	Rztot-90cm	n.s.	
10-20 cm	RP-0cm	n.s.	RP-45cm	n.s.	RP-90cm	n.s.	
	Rzfina-0cm	n.s.	Rzfina-45cm	n.s.	Rzfina-90cm	n.s.	
	Rzmed-0cm	n.s.	Rzmed-45cm	n.s.	Rzmed-90cm	n.s.	
	Rzgrue-0cm	n.s.	Rzgrue-45cm	n.s.	Rzgrue-90cm	n.s.	
	Rztot-0cm	n.s.	Rztot-45cm	n.s.	Rztot-90cm	n.s.	

2.6.6. Perfiles de Resistencia a la Penetración.

Se analizó el perfil de RP, tomando el punto sobre la LP (0 cm), el punto intermedio desde la LP (45 cm hacia ambos lados del árbol) y el punto ubicado sobre el ES (90 cm hacia ambos lados del árbol). Los valores obtenidos fueron promediados para los estratos 0-2,5; 2,5- 5, 5-7,5; 7,5-10; 10 -12,5, 12,5- 15; 15-17,5; 17,5-20 cm. La RP analizada fue corregida por el contenido hídrico del suelo. En la Figura 2.10; 2.11. y 2.12 se observa que la RP evaluada a los 0 cm, 45 cm y 90 cm de distancia del árbol presentó un aumento en profundidad para todos los tratamientos. La RP medida a los 45 y 90 cm de distancia del árbol muestra valores entre los 2 y 8 MPa. El tratamiento de C+S es el que muestra las menores RP, en todo el perfil del suelo, tanto para la medición a los 0 cm, como a los 45 cm de distancia del árbol. En el caso de la RP a los 90 cm de distancia del árbol no presenta grandes diferencias entre los tratamientos.

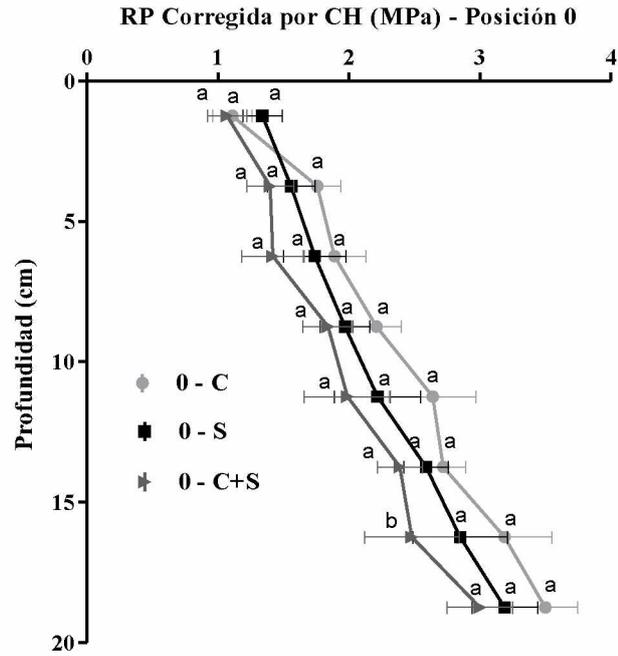


Figura 2.10. Resistencia a la penetración evaluada a los 0 cm de distancia del árbol. Evaluación realizada hasta los 20 cm de profundidad. Tratamientos evaluados: C+S, C y S. Diferencias estadísticas ($P < 0,05$) se indican con letras distintas.

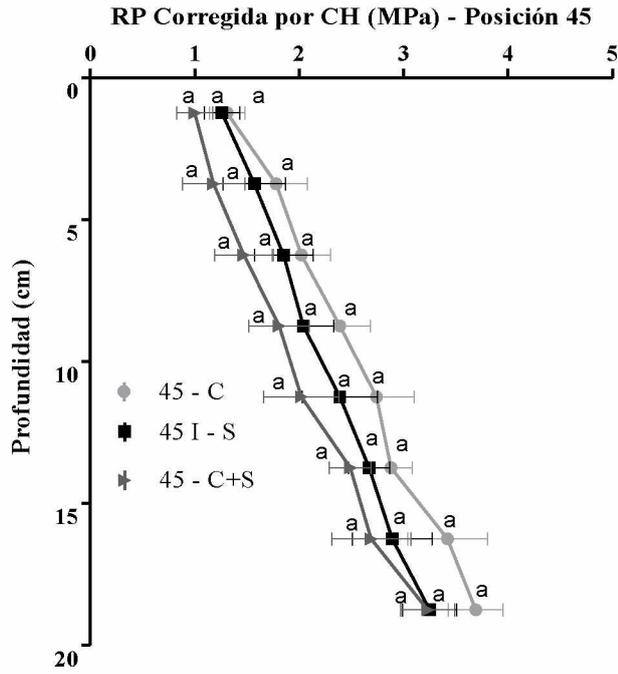


Figura 2.11. Resistencia a la penetración evaluada a los 45 cm de distancia del árbol. Evaluación realizada hasta los 20 cm de profundidad. Tratamientos evaluados: C+S, C y S. Diferencias estadísticas ($P < 0,05$) se indican con letras distintas.

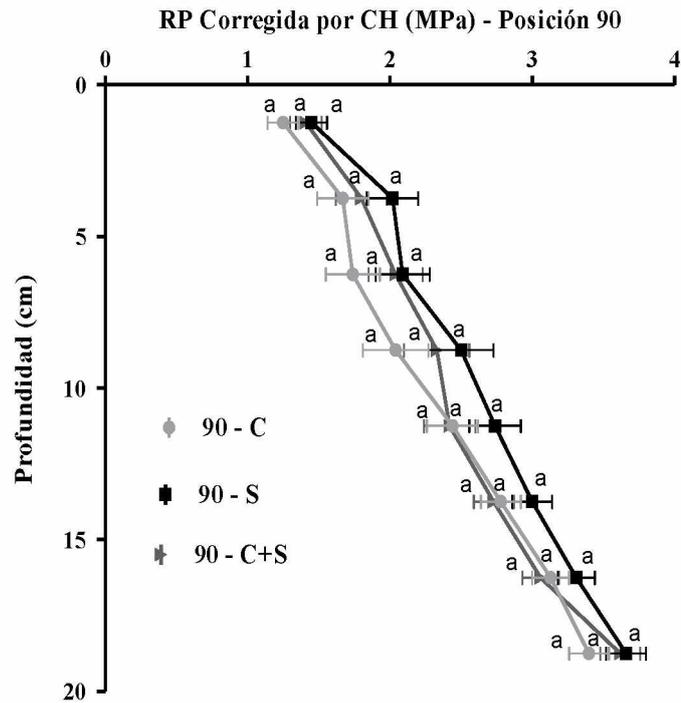


Figura 2.12. Resistencia a la penetración evaluada a los 90 cm de distancia del árbol. Evaluación realizada hasta los 20 cm de profundidad. Tratamientos evaluados: C+S, C y S. Diferencias estadísticas ($P < 0,05$) se indican con letras distintas.

2.6.6.1. Resistencia a la penetración y número de raíces en los tratamientos: Análisis de perfiles.

Los perfiles de RP realizados en la transecta perpendicular a la línea de plantación (LP) y con un distanciamiento de 15 cm en cada uno de los puntos, teniendo como referencia que la distancia en 0 cm (LP) es en donde se ubicaba el árbol, son presentados en las Figuras 2.13, 2.14 y 2.15, respectivamente. La asignación de colores se realizaron para mostrar las variaciones en la RP. Se seleccionaron perfiles representativos por tratamiento, tratamiento C (Figura 2.13), tratamiento C+S (Figura 2.14) y tratamiento S (Figura 2.15). Los valores de RP empiezan a aumentar hacia los estratos más profundos del suelo (como es el caso de los tratamientos de S y C+S).

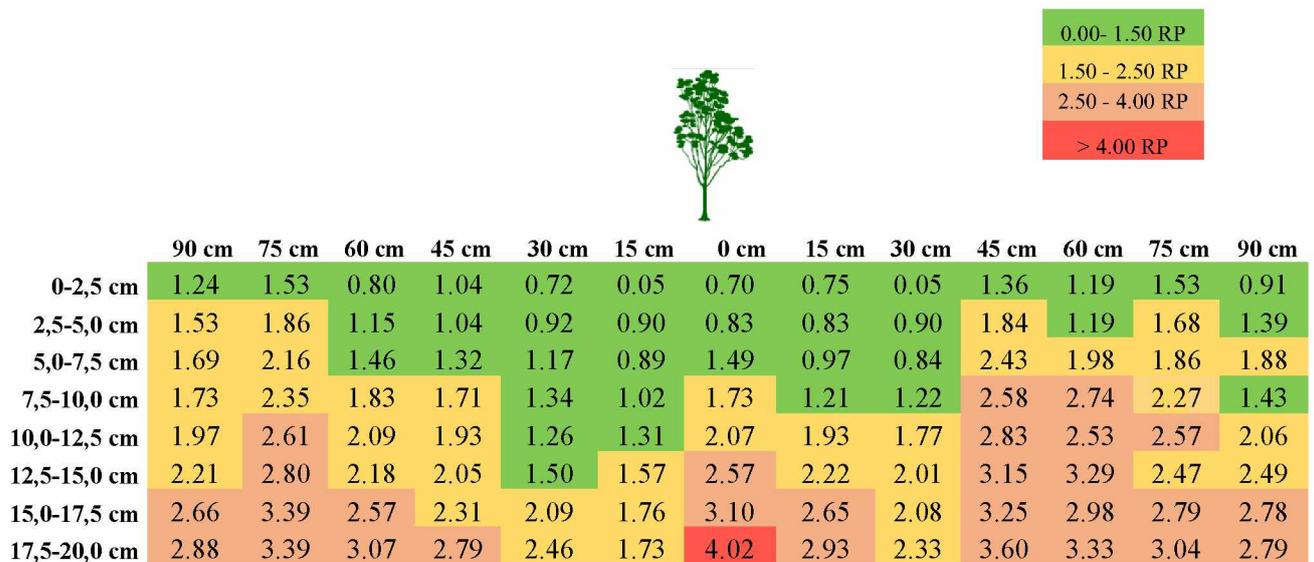


Figura 2.13. Perfiles de resistencia a la penetración de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento C, de la parcela 4, individuo 2. En cada cuadrante aparece el valor de resistencia a la penetración obtenido para ese punto de medición. Colores diferentes indican grado de resistencia a la penetración que ofrece el suelo, menores

resistencias aparecen con un color verde, mayores resistencias se presentan con un color naranja a rojo. La imagen del árbol indica la línea de plantación.

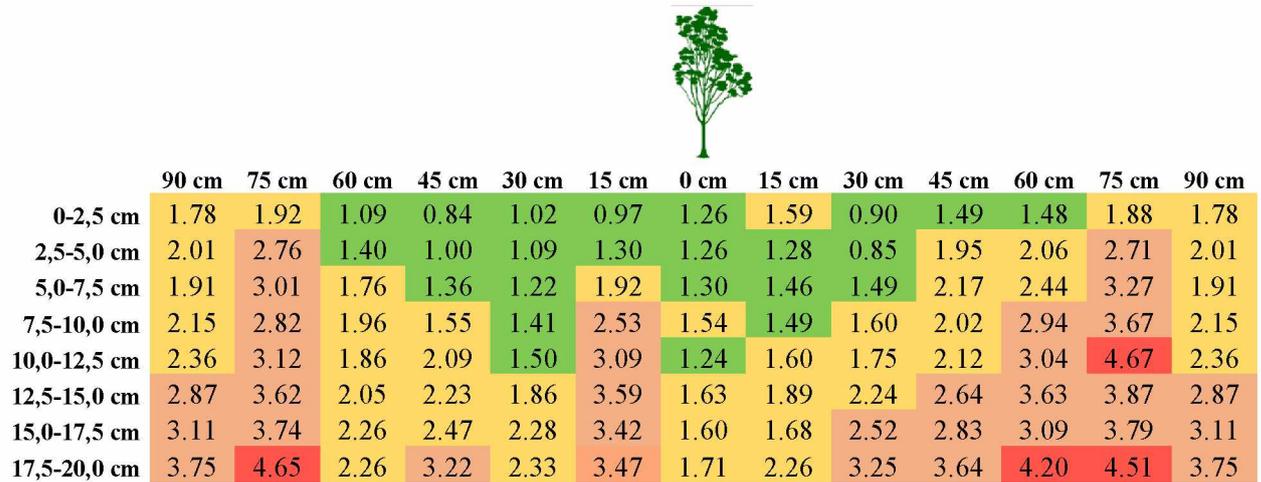


Figura 2.14. Resistencia a la penetración en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento C+S, de la parcela 3, individuo 1. En cada cuadrante aparece el valor de resistencia a la penetración obtenido para ese punto de medición. Colores diferentes indican grado de resistencia a la penetración que ofrece el suelo, menores resistencias aparecen con un color verde, mayores resistencias se presentan con un color naranja a rojo. La imagen del árbol indica la línea de plantación.



	90 cm	75 cm	60 cm	45 cm	30 cm	15 cm	0 cm	15 cm	30 cm	45 cm	60 cm	75 cm	90 cm
0-2,5 cm	1.85	1.47	1.18	1.32	1.58	2.03	2.05	1.79	2.05	1.32	1.43	1.76	1.63
2,5-5,0 cm	2.99	1.76	0.32	1.32	1.76	1.93	2.17	1.96	2.17	1.50	2.07	1.84	1.71
5,0-7,5 cm	2.84	1.83	1.19	1.63	1.92	2.02	2.42	1.99	2.42	1.67	1.32	2.10	1.62
7,5-10,0 cm	3.01	1.83	0.94	2.06	2.34	2.12	2.60	2.10	2.60	1.82	1.17	1.43	2.11
10,0-12,5 cm	2.91	1.91	1.05	2.64	2.31	2.23	2.95	2.41	2.95	1.84	2.42	2.63	2.25
12,5-15,0 cm	3.06	2.45	1.88	3.26	2.31	1.97	3.55	2.70	3.55	2.37	2.98	2.65	2.68
15,0-17,5 cm	3.97	2.66	2.22	3.26	2.39	2.38	3.78	3.14	3.78	2.85	3.25	2.83	3.23
17,5-20,0 cm	4.25	2.89	2.71	3.87	2.74	2.83	4.48	3.34	4.48	3.51	3.76	3.58	3.40

Figura 2.15. Resistencia a la penetración en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento S, de la parcela 1, individuo 2. En cada cuadrante aparece el valor de resistencia a la penetración obtenido para ese punto de medición. Colores diferentes indican grado de resistencia a la penetración que ofrece el suelo, menores resistencias aparecen con un color verde, mayores resistencias se presentan con un color naranja a rojo. La imagen del árbol indica la línea de plantación.

De igual forma se esquematizaron los perfiles de raíces. En la Figura 2.16. el tratamiento de C se observa la distribución de la presencia de raíces del tratamiento C, en la Figura 2.17. el tratamiento C+S y, en la Figura 2.18 el tratamiento S. De igual forma la mayor presencia de raíces se encuentra en los primeros centímetros del suelo, coincidiendo con las áreas que presentan menores RP (Figura 2.13, 2.14, 2.15).

1-5 raíces
5-10 raíces
10-15 raíces
15-20 raíces
>20 raíces

T = total
F =fina (<0,14 mm)
M = media (0,14-0,37 mm)
G = gruesa (>0,37 mm)

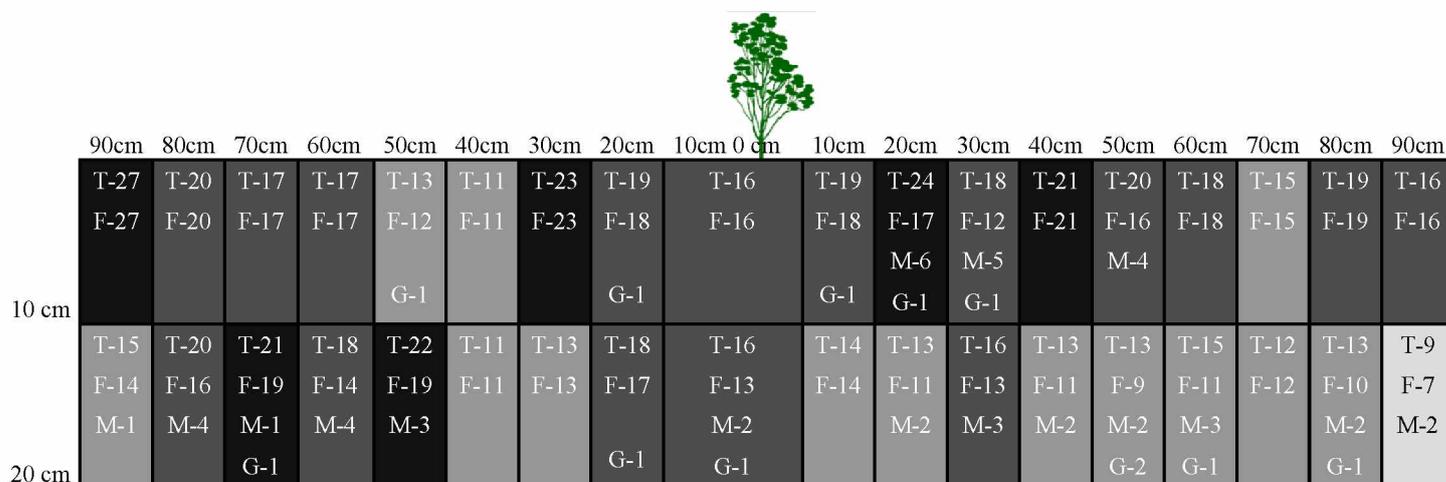


Figura 2.16. Presencia y tamaño de raíces en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento C, de la parcela 4, individuo 2. En cada cuadrante aparece la cantidad de raíces encontradas y el tamaño al cual corresponden. Colores diferentes indican mayor o menor presencia de raíces, colores grises más claros indican una menor presencia; colores más oscuros como el negro indican un mayor número de raíces totales.

Cuando observamos la RP medida en el tratamiento de C+S (Figura 2.14.), se observa que la preparación del suelo con subsolador contribuyó al aflojamiento del suelo en la zona cercana a la línea de plantación, obteniéndose las menores RP y una mayor cantidad de raíces (Figura 2.17.) distribuidas en el perfil evaluado. Las mayores resistencias a la RP empiezan a obtenerse a partir de los 15 cm de profundidad, mayormente en las zonas en donde no hubo efecto de la púa de la maquinaria.



	90cm	80cm	70cm	60cm	50cm	40cm	30cm	20cm	10cm	0 cm	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm
10 cm	T-14	T-10	T-12	T-18	T-10	T-10	T-16	T-23	T-14	T-16	T-17	T-10	T-14	T-15	T-12	T-17	T-27	T-19	
	F-13	F-9	F-10	F-18	F-10	F-10	F-15	F-20	F-11	F-15	F-16	F-8	F-14	F-15	F-12	F-16	F-27	F-18	
	M-1	G-1	M-1				M-1	M-2	M-3		G-1	G-1	M-1			M-1		M-1	
20 cm	T-20	T-11	T-15	T-19	T-25	T-30	T-18	T-21	T-18	T-10	T-9	T-12	T-20	T-15	T-17	T-14	T-23	T-16	
	F-13	F-3	F-14	F-16	F-20	F-26	F-16	F-19	F-14	F-10	F-9	F-12	F-20	F-14	F-16	F-13	F-23	F-16	
	M-5	M-5		M-3	M-3	M-3	M-1	M-1	M-4					M-1	M-1	M-1			
	G-2	G-3	G-1		G-2	G-1	G-1	G-1											

Figura 2.17. Presencia y tamaño de raíces en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento C+S, de la parcela 3, individuo 1. En cada cuadrante aparece la cantidad de raíces encontradas y el tamaño al cual corresponden. Colores diferentes indican mayor o menor presencia de raíces, colores grises más claros indican una menor presencia; colores más oscuros como el negro indican un mayor número de raíces totales.

En el tratamiento de S, mostro los valores más altos de RP en comparación a los tratamientos de C y C+S (Figura 2.15.). Después de los 12.5 cm de profundidad se observa el aumento de la RP, a lo largo de los puntos de medición seleccionados, este aumento en la resistencia concuerda con una disminución en la presencia total de raíces (Figura 2.18.) observadas en esta misma zona para el mismo árbol. Los menores valores de RP se observan en los primeros estratos del suelo.



	90cm	80cm	70cm	60cm	50cm	40cm	30cm	20cm	10cm	0 cm	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm	60cm	70cm	80cm	90cm
10 cm	T-11	T-29	T-22	T-15	T-7	T-22	T-20	T-15	T-14	T-36	T-18	T-19	T-17	T-10	T-21	T-18	T-9	T-20	T-14
	F-11	F-29	F-22	F-15	F-7	F-20	F-20	F-15	F-14	F-36	F-16	F-17	F-16	F-10	F-19	F-17	F-6	F-19	F-13
20 cm	T-11	T-15	T-11	T-18	T-23	T-15	T-13	T-10	T-15	T-10	T-15	T-17	T-12	T-9	T-13	T-10	T-5	T-14	T-11
	F-10	F-15	F-10	F-18	F-20	F-13	F-13	F-10	F-14	F-10	F-13	F-14	F-11	F-9	F-12	F-9	F-5	F-12	F-10
	G-1		M-1		M-3	M-1			M-1		M-1	G-3	G-1		M-1	M-1		M-1	G-1

Figura 2.18. Presencia y tamaño de raíces en perfiles de suelo de 1,80 m x 0,20 m. Corresponde al tratamiento S, de la parcela 1, individuo 2. En cada cuadrante aparece la cantidad de raíces encontradas y el tamaño al cual corresponden. Colores diferentes indican mayor o menor presencia de raíces, colores grises más claros indican una menor presencia; colores más oscuros como el negro indican un mayor número de raíces totales.

2.7. Discusión

El análisis de caracterización del suelo por estratos y entre tratamientos mostrado en la Tabla 2.1 permitió observar que, para los tres tratamientos implementados, el contenido de MO fue mayor en el S, lo que estaría explicando los resultados obtenidos en variables como la Sort, en este tratamiento. En cuanto a la evaluación textural, la arena se acumuló principalmente en los estratos superficiales en el tratamiento con camellones, pudiendo ser debido a la remoción del suelo desde los estratos subsuperficiales hacia los estratos superficiales del suelo. La fracción limo presente en el estrato superficial mostró un mayor contenido en el tratamiento de S seguido del tratamiento de C+S y por último en el tratamiento de C. En el caso de la fracción arcilla se presentó mayor concentración desde las zonas más profundas, hacia las más superficiales, siendo más significativo en el tratamiento C.

La evaluación de variables dasométricas como el DAP promedio del rodal, en cada tratamiento, y el AB (Figura 2.9.), permite identificar el efecto de los tratamientos sobre la productividad de las plantas. Es así como encontramos que estas variables fueron mayores para el tratamiento de C y C+S, diferenciándose de S. Del mismo modo a lo hallado por Martínez González et al. (2015) quienes también encontraron que la aplicación en el suelo de la técnica de manejo de subsolado con camellones, permitió un mejor establecimiento inicial para distintas especies arbóreas. En este ensayo el tratamiento de C también mostró un buen desarrollo para los árboles, resultados observados cuando se evaluaron las variables dasométricas a los 2 años de establecida la plantación.

El análisis de variables hidrofísicas del suelo (Tabla 2.2) nos permitió entender mejor la influencia de los tratamientos implementados en las características del suelo.

Es así que cuando se analizaron los resultados de la Sort en las tres preparaciones del suelo (Figura 2.3.), los valores fueron mayores en C+S respecto de S, y C fue intermedio. La MO de ambos estratos (0-10 y 10-20 cm) fue mayor en S pudiendo estar relacionado con el efecto sobre la Sort.

El pretratamiento de humedecimiento rápido (T1) cuantifica el estallido de agregados por presión de aire, los resultados obtenidos (Figura 2.4.) muestran que el tratamiento de S presentó los menores valores, lo cual indica la fragilidad de los suelos sometidos a este tratamiento (en comparación con los otros dos tratamientos aplicados), frente a este mecanismo de desagregación y que puede ser explicado como una alta fragilidad a la degradación física (Le Bissonnais, 1996; Kraemer, 2015), a pesar del mayor contenido de MO. En cambio, los tratamientos de C+S y C presentaron los valores más altos, lo que indica una menor fragilidad del suelo y una mayor estabilidad de este.

Cuando se evaluaron los resultados del análisis de la EE y el promedio de los 3 pretratamientos utilizados (Figura 2.5.), se obtuvo que tanto para el tratamiento de C, C+S y S, los valores de EE obtenidos son estables, esto puede deberse a que los suelos pertenecientes al orden vertisol, presentan una alta estabilidad de agregados en forma natural, debido a los complejos húmico-arcillosos formados en estos suelos y en donde es importante el tipo de arcilla presente (esmeclitas), ya que los mismos aportan una mayor superficie específica a los agregados (Paz Ferreiro et al., 2009)

En la Figura 2.7. se pudo observar que el tratamiento C presentó un menor PMP, afectando la disponibilidad del agua en el suelo (Lal, 1994).

Y finalmente, la PT (Figura 2.8.) presenta diferencias entre las posiciones evaluadas. La generación de camellones en el suelo mejora la distribución de poros del

suelo, lo que contribuye a mejorar la aireación del suelo; el paso del subsolado contribuye en la reducción de la compactación del suelo, por lo que en conjunto, ambos manejos combinados contribuyeron a que se diera un cambio en la distribución y continuidad del sistema poroso (Sch, 1999), lo que se evidencia con los valores obtenidos sobre la LP.

El análisis de correlaciones entre las variables bajo estudio (Tabla 2.3.) muestra una fuerte correlación directa para las variables PMP; CC y MO 0-10 cm siendo que para ambos contenidos de humedad en el suelo existe un incremento en el contenido de la materia orgánica, coincidiendo con lo encontrado por Norzagaray Campos et al.,(2006); Salcedo-Pérez et al., (2007); Martínez-González et al., (2010) quienes indican que un mayor contenido de MO en el suelo contribuye a aumentar la retención de humedad en los suelos. La correlación directa que existe entre las variables PT, PMP y K_{sat} responde a la función que tienen los poros del suelo de conducir y almacenar fluidos, función que también ha sido estudiada por otros autores ((Dexter, 2004; Dorner y Dec, 2007); cuando el sistema poroso del suelo se ve afectado, las condiciones de retención de humedad también se ven afectadas (Salamanca y Sadeghian, 2006). En cuanto al análisis de MO y Sort, dado que los mayores contenidos de MO fueron encontrados en el tratamiento de S y una menor Sort se presenta en este tratamiento, se demuestra que frente a un contenido considerable de MO la repelencia al agua en el suelo aumenta. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Orellana (2011) quien menciona que a mayores porcentajes de MO en el suelo, se presenta una baja sortividad, debido a la repelencia que generan los compuestos que conforman la materia orgánica, frente al contenido hídrico del suelo.

Por otro lado, también se hallaron correlaciones directas entre las variables PT, Sort, K_{sat} , T_1 , T_2 , T_3 , P_{Agreg} , EE, dado que todas son variables que evalúan el

movimiento del agua por el sistema poroso del suelo (Teare y Peet, 1983; Soracco et al., 2009; Aguirre et al., 2010; Villarreal et al., 2015).

Los resultados obtenidos en el análisis de correlaciones (Tabla 2.3.) entre las variables DA, PT, PMP y CC indican que las variables que evalúan las características físicas del suelo pueden verse afectadas por una disminución o aumento en el contenido hídrico del suelo, estos resultados coinciden con lo encontrado por Illston y Basara, (2002); Hossne y Américo, (2008), quienes mencionan que existe una relación inversamente proporcional entre estas variables físicas e hídricas. El aumento o disminución en la DA es un factor que afecta el sistema poroso del suelo y por ende a todas las funciones que estén relacionadas con el mismo, como por ejemplo con el contenido y movimiento del agua en el suelo. Estas variables pueden verse afectadas por una disminución del sistema poroso del suelo (Dorner y Dec, 2007b; Dörner y Horn, 2006).

El análisis de la presencia de raíces (Tabla 2.4.) entre los estratos de 0-5 cm y de 5-10 cm demostró que las raíces de tamaño medio y grueso presentaron una mayor cantidad en aquellos tratamientos que incluyeron la formación de un camellón (C y C+S), en comparación con el tratamiento que solo llevaba el paso del subsolador (S). Ese mayor número de raíces en el área en donde fueron establecidos ambos tratamientos (C y C+S), se debió al movimiento del suelo, generado para la formación del camellón, lo que provoca una mayor soltura del suelo al momento de la preparación del terreno (Carimentrand et al., 2002).

En las 3 distancias evaluadas (0, 45, 90 cm) los tratamientos mostraron un mismo patrón en cuanto a la RP de todos los tratamientos aumentando en profundidad

(Figura 2.10., 2.11., 2.12.). En la LP (0 cm) el rango de resistencia fue menor, presentando diferencias entre tratamientos y presentando valores por encima de los 2 MPa desde las zonas más superficiales a los 45 y 90 cm de distancia (ES). Los valores de RP encontrados, que superaron los 2 Mpa, son considerados como valores críticos para el crecimiento de las raíces, los valores superiores a 2 MPa afectan la cantidad de raíces presentes en los estratos más profundos del suelo (Tormena et al., 1999; Hossne et al., 2003).

2.8. Conclusión

Los resultados obtenidos mostraron que los tratamientos que incluían la formación de camellones en la preparación del suelo para *Eucalyptus grandis* las variables dasométricas (DAP y AB) tuvieron la mejor performance. En relación con las variables hidrofísicas evaluadas mostraron diferencias significativas entre los tratamientos en la sortividad y la estabilidad estructural en aquellos en los que se implementó los camellones presentando los mejores resultados, del mismo modo que el PMP lo que significa mayor capacidad de agua disponible. En relación con la MO, si bien han presentado menores valores promedio en los tratamientos C y C+S, los valores absolutos se encuentran en torno al 4 % en superficie y 2 % en el estrato subsuperficial. Cuando se evaluó la RP del suelo el tratamiento C+S presentó diferencias significativas a lo largo del perfil en la LP, hecho que se fue diluyendo en la medida que nos acercamos al ES. También se ha observado un registro de un número superior de raíces en C y C+S, de acuerdo a los perfiles analizados.

Los resultados obtenidos también demuestran que, a pesar de haber transcurrido un periodo considerable de tiempo (alrededor de dos años y medio después de haber implementado las practicas mecánicas en el suelo), aun se evidencian los efectos benéficos debido al armado de camellones. Y en vistas de los resultados de las variables dasométricas, no sería necesario la pasada del subsolado, observándose iguales resultados en los tratamientos con camellón únicamente, por todo esto la hipótesis no se acepta.

3. Capítulo.

Respuesta de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden a la fertilización inicial en un suelo arenoso

3.1. Introducción

El *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, es una especie que se adapta a diferentes latitudes, y por lo tanto a diferentes climas, desde las zonas bajas subtropicales hasta las regiones tropicales (Rokich y Bell, 1995; Granados-Sánchez y López-Ríos, 2007). Se puede señalar que, en general, posee altas tasas de crecimiento, y que se adapta muy bien a diferentes tipos de suelo (Hernández et al., 2006). Como en la mayoría de las especies, su productividad puede ser muy variable de acuerdo con las condiciones de clima y suelo del sitio de plantación. Esta puede variar ampliamente entre los 20 m³/ha/año y los 50 m³/ha/año de incremento medio anual (Schönau, 1984; Goya et al., 1997; Vallejo y Zapata, 2018). Esta variación dependerá principalmente de los factores del sitio, como son las temperaturas, precipitaciones, tipo de suelo y profundidad efectiva del mismo y las técnicas silviculturales que sean implementadas, como la fertilización durante el establecimiento de la plantación.

La productividad de las plantaciones comerciales de *Eucalyptus* establecidas en suelos poco fértiles, pueden ser mejoradas mediante la tecnología de fertilización, es decir, adecuando la provisión de fertilizantes en relación con la dosis y el momento. En el caso de suelos arenosos, su baja retención de nutrientes debido a su baja capacidad de intercambio catiónico, bajo contenido de materia orgánica y baja retención hídrica. los convierte en suelos susceptibles a la lixiviación y pérdida de nutrientes por drenaje profundo, lo que contribuye a que la dosis y el momento de fertilización sean decisiones claves a establecer (Silva et al., 2013).

En el manejo de plantaciones forestales, la fertilización es una práctica que busca mejorar el establecimiento, el crecimiento inicial del cultivo y la producción, alcanzando de esta manera, hacer un aprovechamiento del rodal en un menor periodo

de tiempo (Gaitán et al., 2004; García y De La Peña, 2013). El rápido crecimiento de *Eucalyptus*, especialmente durante sus primeros años de vida, está muy relacionado con la cantidad de nutrientes del suelo y su disponibilidad, para lograr la formación de tejidos fundamentales que permiten el adecuado desarrollo de la planta, siendo ideal poder contar con un suelo que pueda proporcionarle todos los requerimientos nutricionales (Bonomelli y Suarez, 1999). Cuando la plantación se realiza sobre un suelo que no presenta la capacidad de proveer los recursos necesarios de acuerdo con las exigencias nutricionales de la planta, la fertilización es una práctica que se realiza en este modelo productivo. Los fertilizantes contribuyen a aumentar la productividad en los inicios de las plantaciones, potenciar el sitio para la obtención de madera de alta calidad y ayuda a vigorizar las plantas ante situaciones adversas de origen climático. Se puede alcanzar un mejor rendimiento del rodal a partir de la fertilización con nutrientes que se encuentran en baja disponibilidad en el suelo. En los inicios de una plantación es necesario un adecuado abastecimiento de nutrientes, ya que es en esta etapa donde se desarrollan las raíces, ramas y follaje, que son tejidos de alta demanda nutritiva. En esta primera fase de crecimiento, los nutrientes necesarios para el normal desarrollo de la plantación se obtienen únicamente desde las reservas del suelo, hasta el cierre de copas, donde comienza una etapa de reciclaje. El reciclaje se refiere al retorno de nutrientes por parte de la hojarasca y raíces finas al suelo, donde luego de la descomposición, los nutrientes son liberados para ser absorbidos nuevamente (Brandstatter, 2004).

Aunque la fertilización en las plantaciones forestales no es una práctica muy común dentro de la producción forestal argentina (Ibañez et al., 2004), sus efectos sobre la productividad de la especie *Eucalyptus* han sido objeto de estudio de varios autores (Aguerre et al., 1995; Bonomelli y Suarez, 1999; Gaitán et al., 2004; Rubilar et al., 2008). Algunos de los efectos positivos generados sobre la productividad de *Eucalyptus*

por la aplicación de nutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) han sido bien documentados (Cromer et al., 1993; Fernández et al., 2003; Graciano et al., 2006, 2005; García et al., 2020).

En particular, la adición de K puede generar diversos mecanismos de defensa de la planta contra plagas y enfermedades, para enfrentar condiciones de sequía y de heladas (Silveira, 2000; Battie-Laclau et al., 2014, 2016,). Esto se debe a las funciones metabólicas que tiene el K en la planta son de gran importancia, ya que actúa en la activación de diversas enzimas, además de ello se encuentra involucrado en la síntesis de proteínas (Silveira, 2000).

La dosis de un fertilizante debe ser estimada a partir del análisis químico sobre la dotación de nutrientes en el suelo, la demanda nutricional del cultivo y la eficiencia de absorción de los nutrientes aplicados (Brandstatter, 2004). En Argentina, existe mucha información sobre modelos de fertilización para distintos nutrientes, y cultivos anuales. Sin embargo, la información que se encuentra para fertilización de especies perennes es más escasa y se encuentra atomizada, sin brindar redes para su análisis conjunto. Es por ello que este capítulo analizará un ensayo de fertilización en la etapa inicial del cultivo de *Eucalyptus* en suelos arenosos de la zona de Gualeguaychú. Es así que, en este contexto, donde el suelo presenta pobres características en retención hídrica y baja capacidad de intercambio catiónico se hace necesario evaluar los efectos de fertilización, en particular con K debido al potencial de mejora sobre la performance de las plantas en condiciones de sequía y heladas. Teniendo en cuenta la escasa información en relación a los efectos que puede otorgar la aplicación de fertilizantes en suelos en donde el contenido de nutrientes es bajo debido a las condiciones del mismo, se hace necesaria la generación de mayor información sobre la respuesta de *Eucalyptus grandis* a la aplicación de distintas dosis de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K).

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo General

Determinar la respuesta de *Eucalyptus grandis* a la fertilización de diferentes nutrientes, sus combinaciones y dosis.

3.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar si la fertilización contribuye a aumentar la sobrevivencia de la especie *Eucalyptus grandis* durante la etapa de establecimiento en un suelo arenoso.
- Identificar nutrientes y dosis que generen los mayores efectos positivos sobre la productividad de la especie durante la etapa de establecimiento.

3.3. Hipótesis

En suelos arenoso, con un contenido bajo de nutrientes, la fertilización inicial de *Eucalyptus grandis*, indistintamente del nutriente y la dosis que se considere, contribuye a lograr un mejor desarrollo de la plantación, generando mayor sobrevivencia y mayores beneficios sobre la productividad y desarrollo metabólico de la planta.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Tratamientos y diseño del ensayo

El ensayo se realizó sobre los suelos arenosos pertenecientes a la serie “Puerto Unzue” (ver la sección de materiales y métodos general). El uso previo de este lote fue forestal, específicamente, proviene de una plantación de pino. Durante la preparación del suelo no se quemaron los residuos, estos se mantuvieron en superficie con escollerado, cada 4 filas. Se realizó un control previo de las malezas y se plantó a una distancia de 3 m x 3 m. La plantación fue directa y fue realizada el 24 de septiembre de 2015.

Los tratamientos se establecieron entre fines de octubre y principios de noviembre de 2015, la forma de aplicación de los fertilizantes fue en corona circular. La cantidad de tratamientos fue de 27, que surgen de la combinación de 3 nutrientes, 3 dosis y 3 repeticiones. El N se aplicó como Urea, con dosis de 0, 45, 90 gN/pl. El P se aplicó como Superfosfato triple, cuyas dosis fueron: 0, 90, 180 gP/pl. Finalmente el K se aplicó con la sal Cloruro de potasio, siendo sus dosis 0, 50, 100 gK/pl (Tabla 3.1.). El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados. Se bloqueó de acuerdo a la diferencia en posición topográfica, siendo que el bloque I y II se encontraban en una zona más plana, de poca pendiente, ubicándose el bloque I en una posición más alta que el bloque II. Mientras que el bloque III se encontraba ubicado en un bajo con mayor pendiente (Figura 3.1.).

Tabla 3.1. Identificación de los 27 tratamientos resultado de los tres nutrientes (N: nitrógeno, P: fósforo y K: potasio), fuentes: Urea (U), superfosfato triple (SFT) y cloruro de potasio (ClK), y las dosis de acuerdo al nutriente (N: 0,45,90, P: 0.90.180, K:0, 50, 100).

Trat.	U (gN/pl)	SFT (gP/pl)	ClK (gK/pl)
1	0	0	0
2	0	90	0
3	0	180	0
4	0	0	50
5	0	90	50
6	0	180	50
7	0	0	100
8	0	90	100
9	0	180	100
10	45	0	0
11	45	90	0
12	45	180	0
13	45	0	50
14	45	90	50
15	45	180	50
16	45	0	100
17	45	90	100
18	45	180	100
19	90	0	0
20	90	90	0
21	90	180	0
22	90	0	50
23	90	90	50
24	90	180	50
25	90	0	100
26	90	90	100
27	90	180	100

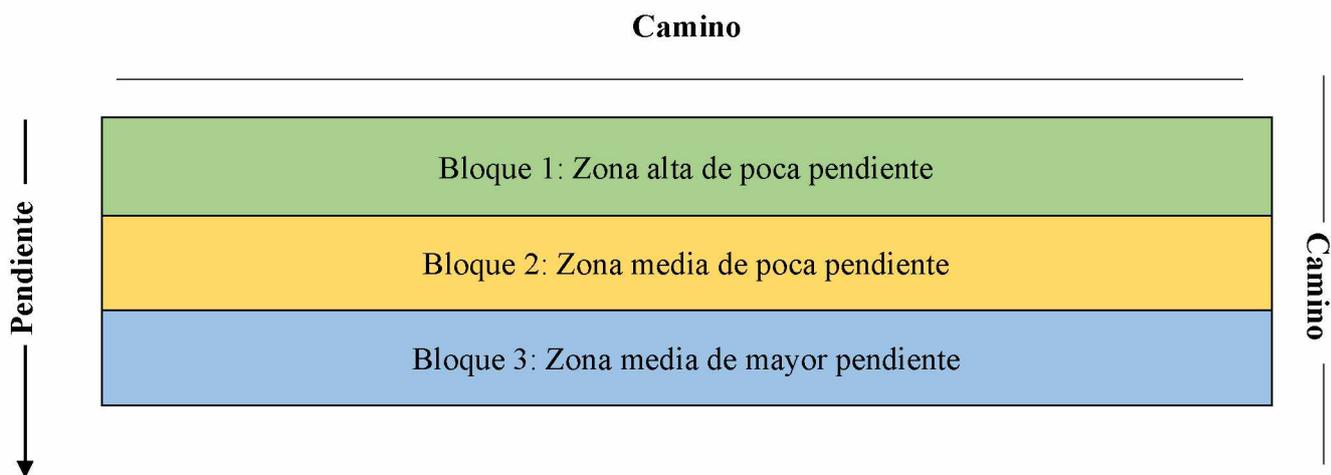


Figura 3.1. Ubicación de los bloques en el terreno

3.4.2. Muestreo y Análisis Realizados

Se procedió a tomar muestras de suelo para su caracterización, hasta una profundidad de 0-20 cm (Figura 3.2.). Se midió el contenido de carbono orgánico (CO) por el método de Walkley y Black (1934) y la distribución del tamaño de las partículas (DTP) por el método de Bouyoucos para determinar la textura. También se evaluó la densidad de partícula (D_r) mediante el método del picnómetro.



Figura 3.2. Toma de muestras en el suelo arenoso.

En la DTP, además, se identificaron diferentes tamaños de las arenas, utilizando tamices con distinta apertura de malla (0,5mm, 0,25 mm, 0,1 mm y 0,05 mm) para determinar la fracción arena que se encontraba en el suelo bajo estudio, siguiendo la clasificación de USDA:

- > 0,5 mm arena gruesa
- 0,5 – 0,25 mm arena mediana
- 0,25 – 0,1 mm arena fina
- 0,1 – 0,05 mm arena muy fina

En cuanto al componente forestal el porcentaje de sobrevivencia fue evaluado sobre los árboles, determinado en base a la relación entre el número de plantas que fueron plantadas y el número de plantas vivas encontrada al momento de la medición. Además, se midió la altura de las plantas a los 11 meses, utilizando para ello una regla graduada, la cual fue colocada a un costado del árbol para determinar su altura. A los 2 años de plantados los árboles se midió el diámetro a la altura del pecho (1,30 m, DAP) utilizando una cinta diamétrica; y se estimó el área basal de la plantación (AB/ha) a partir del DAP de todos los árboles en pie.

3.5. Análisis estadístico

Para evaluar las variables porcentaje de sobrevivencia, altura, diámetro promedio a la altura del pecho (DAP) y área basal (AB) de las plantas, por tratamiento, se realizó un análisis de varianza (ANVA) (Snedecor y Cochran, 1980). Cuando se encontraron efectos significativos, se utilizó el test de diferencias mínimas significativas (*least significant difference* –LSD-) para comparar las medias de los tratamientos (Infostat/P v1.1, 2002).

3.6. Resultados

3.6.1. Caracterización del Suelo

En la Tabla 3.2. se presentan los resultados del análisis granulométrico realizado para la caracterización del suelo de los tres bloques en donde fue establecido el ensayo. Se obtuvo un mayor contenido de arena en el bloque I y el bloque II respecto del bloque III, que presentó un menor contenido de esta fracción. En el caso de la fracción arcilla, hubo un mayor contenido en el bloque III, seguido del bloque I y el bloque II. La fracción limo presentó el siguiente orden: bloque III > bloque II < bloque I.

Tabla 3.2. Caracterización de suelo en relación a la distribución de tamaños de partículas (DTP) y tamaños arenas (>0,5, 0,5-0,25, 0,25-0,1, 0,1-0,05 mm) densidad real (Dr) y contenido de carbono orgánico del suelo (CO) para los bloques I, II y III. Valores entre paréntesis corresponden al error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre bloques mediante el test *LSD Fisher* ($P < 0,05$).

		Bloque I	Bloque II	Bloque III
DTP	Arcilla (%)	11,7 (0,60) b	8,3 (0,33) c	15,3 (0,76) a
	Limo (%)	5,6 (0,14) c	6,9 (0,33) b	7,2 (0,12) a
	Arena (%)	82,5 (0,56) a	84,7 (0,65) a	77,5 (0,85) b
Tamaño de Arenas	0,05-0,1 mm (%)	2,7 (0,26) a	2,1 (0,09) a	2,6 (0,22) a
	0,1-0,25 mm (%)	15,9 (1,06) b	18,1 (2,71) a	18,5 (1,24) a
	0,25-0,5 mm (%)	60,4 (1,36) ab	61,5 (3,49) a	53,6 (0,89) b
	> 0,5 mm (%)	3,5 (0,17) a	2,9 (0,20) ab	2,6 (0,09) b
Dr (Mg/m³)		2,4 (0,12) a	2,3 (0,07) a	2,2 (0,07) a
CO (%)		1,0 (0,05) b	0,8 (0,01) c	1,1 (0,05) a

El análisis de la distribución del tamaño de arenas mostró que la fracción de 0,5-0,25 mm presentó la mayor proporción de este tamaño de arenas. En el caso de la fracción de de 0,1-0,25 mm el bloque I presentó la menor concentración de este tamaño de arenas. La Dr fue similar en los tres bloques y, el CO fue mayor en el bloque III (1,1%), seguido del bloque I (1,0%) y, finalmente, el bloque II (0,8%). De acuerdo a la DTP la textura de estos suelos es Franco arenosa. Sumado a ello, el contenido de CO estos suelos presenta baja capacidad de almacenamiento de agua y un bajo aporte de nutrientes por mineralización.

3.6.2. Efecto de los tratamientos sobre la sobrevivencia de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden (mediciones realizadas a los 11 meses de establecida la plantación).

El análisis estadístico mostró que hubo efecto bloque, en relación al porcentaje de sobrevivencia de los árboles de *Eucalyptus*, siendo el bloque I el que obtuvo los mayores porcentajes de sobrevivencia, diferenciándose del bloque II y III (Tabla 3.3., Figura 3.3.).

Tabla 3.3. Resultados del análisis estadístico del efecto bloque (Bl.), de las dosis de los nutrientes: Nitrógeno (0, 45, 90 gN/pl), fósforo (0, 90, 180 gP/pl) y potasio (0, 50, 100gK/pl); y de la interacción entre las dosis de nutrientes (N*P, N*K, P*K, N*P*K) sobre la sobrevivencia de *Eucalyptus grandis* a los 11 meses de la plantación. Test LSD Fisher ($P < 0,05$).

Variable	Sobrevivencia (P-value)
Dosis de N	n.s.
Dosis de P	n.s.
Dosis de K	n.s.
Bl.	0,0024
N*P	n.s.
N*K	n.s.
P*K	0,0392
N*P*K	n.s.

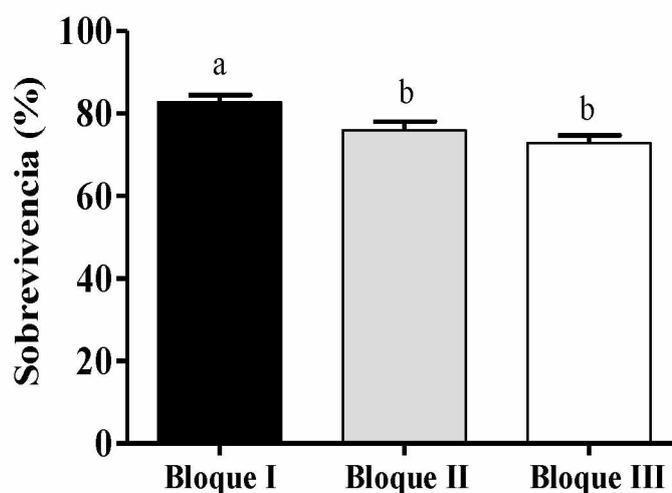


Figura 3.3. Porcentaje de sobrevivencia de *Eucalyptus grandis* a los 11 meses de la plantación en cada uno de los bloques del ensayo Letras distintas indican diferencias significativas entre bloques ($P < 0,05$).

Respecto a los tratamientos se encontraron diferencias significativas en la interacción fertilización P*K sobre la sobrevivencia (Tabla 3.3.). Esta interacción, de acuerdo a lo observado en la Figura 3.4 parecería responder a la caída que ocurre en sobrevivencia en las dosis más altas. Con el objetivo de analizar si la ausencia de fertilización (0P y 0K) no afecta la sobrevivencia se realizaron análisis de contrastes. Los resultados arrojaron que cuando se aplican dosis intermedias de P (90 g/pl) y la dosis más alta de K (100 g/pl), el porcentaje de sobrevivencia es mayor (81.85%), que

cuando se aplican las dosis más altas de P (180 g/pl) y de K (100 g/pl) (69.63%). De igual forma es importante mencionar que cuando no se aplican dosis de P, pero sí dosis intermedias y altas de K (50 y 100 g/pl), se obtiene un importante incremento en la sobrevivencia de las plantas.

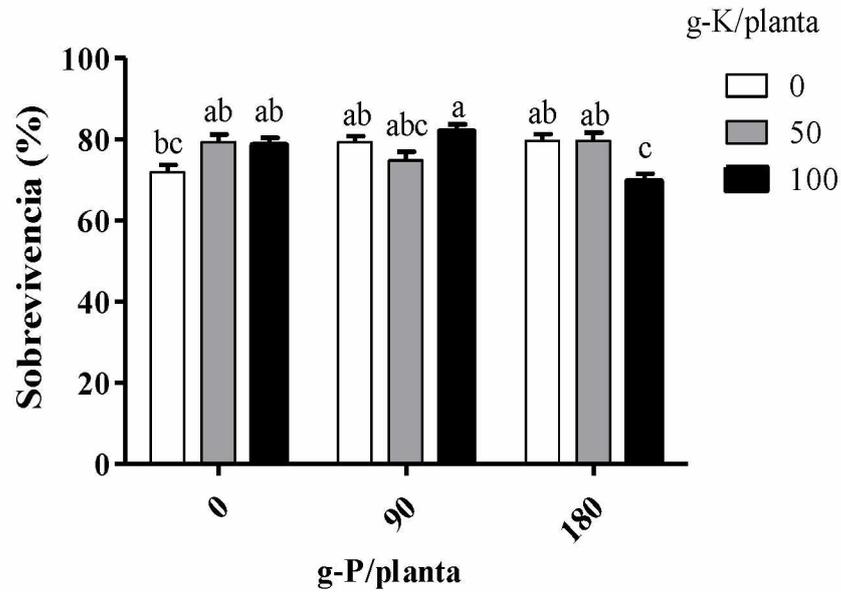


Figura 3.4. Porcentaje de sobrevivencia de *Eucalyptus grandis* como resultado de la interacción significativa ($P=0,0392$) de las dosis de fósforo (0, 90, 100 gP/pl) y potasio (0, 50, 100 gK/pl) a los 11 meses de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

3.6.3. Efecto de los tratamientos sobre la altura medida de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden (a los 11 meses).

En la Tabla 3.4. se sintetiza los resultados del análisis estadístico del ensayo. Se observan diferencias significativas entre bloques, entre dosis de N y P e interacción de la fertilización con P y K.

Tabla 3.4. Evaluación de los tratamientos sobre la altura de *Eucalyptus grandis*, a los 11 meses de establecida la plantación. Test LSD Fisher ($P < 0,05$).

Variable	Altura (P- value)
Dosis de N	0,0050
Dosis de P	0,0030
Dosis de K	n.s.
Bl.	<0,0001
N*P	n.s.
N*K	n.s.
P*K	<0,0001
N*P*K	n.s.

En relación a los bloques, el bloque I presentó el promedio de mayor altura (1,74 m) diferenciándose de los bloques II (1,37 m) y III (1,32 m) (Figura 3.5.).

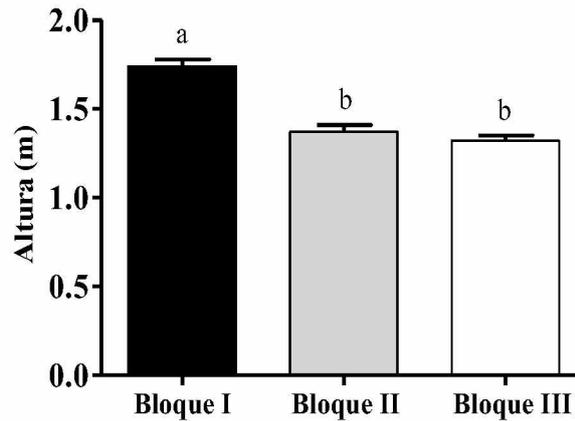


Figura 3.5. Alturas medias de *Eucalyptus grandis* para los bloques a los 11 meses de la plantación. Las barras indican error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre bloques, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

La fertilización con N y con P presentaron un efecto significativo en la altura promedio del rodal, 1,53 m y 1,54 m con las dosis intermedias de N y P, respectivamente; y alturas de 1,52 m para las dosis más altas de N y P. (Figura 3.6.).

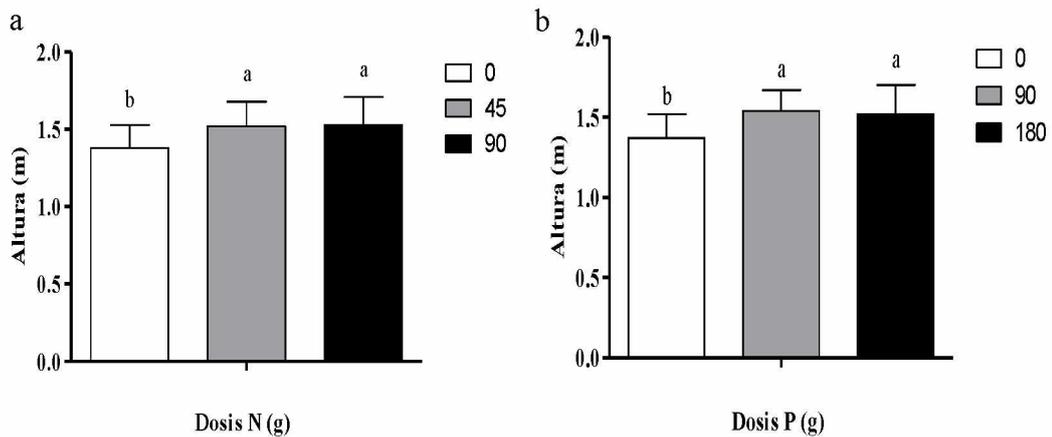


Figura 3.6. (a) Alturas medias de *Eucalyptus grandis* para las dosis de fertilización con nitrógeno (0, 45, 90 gN/pl) y (b) fósforo (0, 90, 180 gP/pl) a los 11 meses de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas entre dosis, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

Los resultados obtenidos de las alturas medidas en las plantas también mostraron interacción significativa entre P*K (Figura 3.6). La interacción parece responder a la caída de respuesta que se obtiene con las dosis más altas de K y P. Se observa que hay un efecto de K cuando la dosis de P es cero. Del mismo modo hay un incremento en la respuesta, cuando se dan aumentos en la dosis de P, cuando no hay fertilización potásica.

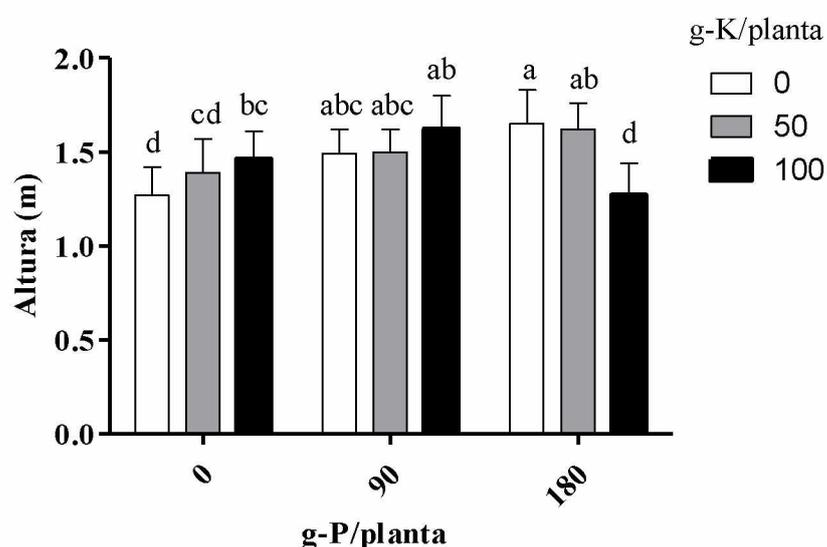


Figura 3.7. Alturas medias de *Eucalyptus grandis* obtenidas en los tratamientos establecidos con dosis de fósforo (0, 90, 180 gP/pl) y potasio (0, 50, 100 gK/pl), a los 11 meses de establecida la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

3.6.4. Efecto sobre el área basal estimada (AB) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden (2 años de la plantación).

En el caso del análisis de las variables AB y DAP, solo se encontraron diferencias significativas entre bloques, no hallándose entre tratamientos (Tabla 3.5.). La mayor AB se obtuvo en el bloque I (3,08 m²/ha), que se diferencia del bloque III (2,47 m²/ha), y en posición intermedia el bloque II (2,88 m²/ha) y por último el bloque III el cual presentó los menores resultados (Figura 3.8.a).

Tabla 3.5. Evaluación de los tratamientos y su influencia sobre el DAP y el AB de *Eucalyptus grandis*, a los 2 años de establecida la plantación. Test LSD *Fisher* ($P < 0,05$).

Variable	DAP (P- value)	AB (P- value)
Dosis de N	n.s.	n.s.
Dosis de P	n.s.	n.s.
Dosis de K	n.s.	n.s.
Bl.	0,0011	0,0181
N*P	n.s.	n.s.
N*K	n.s.	n.s.
P*K	n.s.	n.s.
N*P*K	n.s.	n.s.

En el caso del DAP, los resultados muestran que el bloque III presentó el menor crecimiento diamétrico (DAP: 6,87 cm) (Figura 3.8.b).

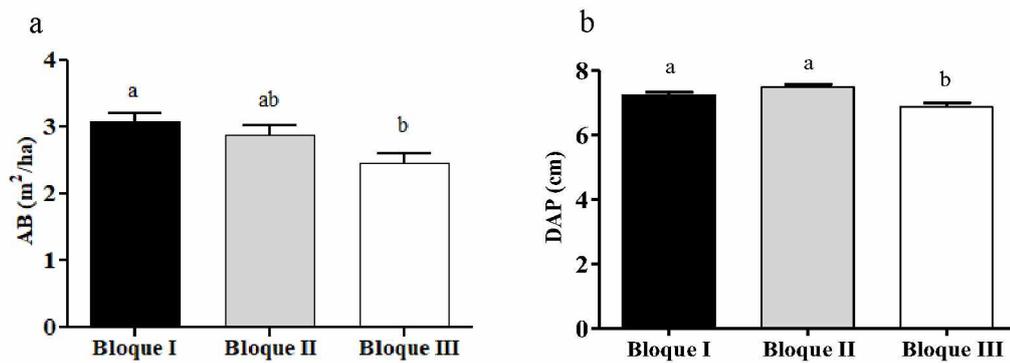


Figura 3.8. (a) Área basal (AB) y (b) diámetro a la altura del pecho (DAP) de *Eucalyptus grandis* por bloque a los 2 años de Letras distintas indican diferencias significativas entre bloques, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

3.7. Discusión

La fertilización puede presentar beneficios, entre ellos está el promover un crecimiento inicial vigoroso para la planta, además de contribuir a mejorar la sobrevivencia de estas en determinadas circunstancias. Siendo que los suelos arenosos tienen baja retención hídrica y son pobres en nutrientes, se recurre a la fertilización, entre otros manejos silviculturales, a fin de contribuir a la sobrevivencia y promover la productividad de *Eucalyptus*.

La caracterización del suelo (Tabla 3.2.) muestra que de acuerdo a la DTP, la textura resultó ser Franca arenosa, con un promedio de 81,6 % de arenas en su composición. y cuyo contenido de CO resultó muy bajo (0,96 %). como lo demostraron los resultados obtenidos por Pereyra et al. (2004), quienes también evaluaron suelos ubicados en la misma zona de estudio. El bloque III, de posición más baja, presentó la menor proporción de arenas y mayor contenido de CO respecto de los otros bloques.

En el caso de la sobrevivencia evaluada a los 11 meses (Figura 3.3.) presentó diferencias significativas entre bloques. El bloque que presentó un mayor porcentaje de sobrevivencia fue el bloque I, seguido del bloque II, lo que podría estar relacionado a que ambos bloques presentaban una menor pendiente, en comparación con el bloque III. Esta menor pendiente posiblemente influyó en que durante mayores periodos de tiempo hubiese una mayor disponibilidad de contenido hídrico en ambos bloques. A diferencia del bloque III que presentó una pendiente más pronunciada, favoreciendo el escurrimiento, que sumado al rápido drenaje que presentan los suelos arenosos, resultó en menor agua disponible para las plantas, afectando la correcta implantación de las mismas (Zotarelli et al., 2019).

En relación a las dosis de fertilizantes aplicadas al suelo arenoso y su influencia en la sobrevivencia de *Eucalyptus* (Figura 3.4.) se encontró respuesta con dosis 0P e incrementos de K y 0K e incrementos de P. Esto coincide con lo encontrado por Cakmak (2005), Wang et al. (2013), Guarnaschelli et al. (2017), quienes indican que el K modifica la mayoría de los procesos bioquímicos y fisiológicos y que además de sus efectos sobre el crecimiento, regula la tolerancia de las plantas expuestas a estrés abiótico, esto explicaría por qué en las parcelas, durante la fertilización con K, la sobrevivencia de las plantas se modifica. De igual forma autores como Malavolta (1997) y Aparicio y Maggio (2018) también mencionan los beneficios que tiene la aplicación de P en el suelo, sobre el crecimiento y sobrevivencia de especies como *Eucalyptus*.

Cuando se analizó la altura medida a los 11 meses de la plantación, se encontró significancia en la interacción P*K. Del mismo modo que la supervivencia y a partir de los análisis de contrastes, se observó que en dosis 0 de P hay incrementos en la altura con aumentos de dosis de K y del mismo modo con dosis 0 de K con incrementos de dosis de P. Otros autores han observado respuestas positivas en la productividad de la planta, cuando se dio la adición de K en conjunto con P y con N (Martíarena, 2003; Guarnaschelli et al., 2017).

También hubo respuesta en la fertilización con P y N. Estos resultados del efecto de fertilización de P y N sobre el crecimiento y productividad de las plantas son acordes a lo encontrado por Aparicio et al. (2003), Graciano (2005), Graciano et al. (2006, 2015) y Aparicio y Maggio (2018). Estos autores observaron que la fertilización con N y P contribuye a aumentar la productividad de las plantas, lo que favorece la ocupación temprana del sitio y, a su vez, permite aumentar la productividad desde el inicio del ciclo de la plantación. A los dos años de la plantación, no se evidenciaron diferencias

significativas entre los tratamientos de fertilización aplicados al inicio, solo se observaron diferencias significativas entre los bloques para las variables medidas de AB y DAP (Figura 3.8.) siendo los bloques I y II los que presentaron los mayores valores absolutos. Estas diferencias observadas entre los bloques estarían explicadas por las diferencias en la posición de cada bloque en el paisaje, las menores pendientes y su capacidad para mantener la humedad por más tiempo, beneficiando la productividad de *Eucalyptus*.

El empleo de técnicas silviculturales adecuadas, durante el establecimiento de las plantaciones, puede favorecer el rápido crecimiento de las especies forestales, durante sus primeras etapas de desarrollo garantizar una rápida ocupación del sitio y un rápido cierre de copas de las plantas (Pallett y Sale, 2004; Gonçalves, 2011; Tertulino Rocha et al., 2019). Sin embargo, estos beneficios no se mantienen a lo largo del tiempo, como lo evidencian las variables evaluadas a los dos años de establecida la plantación.

3.8. Conclusión

Los resultados contribuyen a aceptar la hipótesis planteada, ya que la fertilización con diferentes nutrientes y sus combinaciones, contribuyeron a aumentar la sobrevivencia y el crecimiento de las plantas. Se presentó interacción P*K tanto para la sobrevivencia como para la altura a los 11 meses, observándose que en las dosis más altas combinadas, de ambos nutrientes, las variables respuestas disminuyeron. Finalmente, no hubo respuesta a la fertilización en las variables AB y DAP transcurrido los dos años.

4. Capítulo.

Respuesta de plantines de *Eucalyptus grandis*

Hill Ex Maiden a la fertilización potásica en

condiciones de estrés hídrico

4.1. Introducción

Una de las regiones más importantes para la producción forestal de *Eucalyptus grandis* en la Mesopotamia argentina se ubica sobre suelos arenosos localizados al este de la provincia de Entre Ríos y cercanos al río Uruguay. Son suelos ideales para la producción de esta especie, aunque por su textura gruesa poseen baja retención hídrica y bajo contenido nutricional, por lo cual es necesario implementar algunas prácticas silviculturales que contribuyan a obtener los mejores rendimientos de producción forestal (Flores, 2016). Teniendo en cuenta que el objetivo primordial en el aspecto productivo es lograr el mayor aprovechamiento de la plantación, la influencia de los factores abióticos, como pueden ser las restricciones hídricas, condicionarían el desarrollo del rodal.

La disponibilidad de agua para la planta es un factor determinante de su productividad, debido a que interviene en múltiples funciones y mecanismos fisiológicos. El agua cumple funciones sumamente importantes dentro de la planta como el transporte de nutrientes, la expansión celular, el mantenimiento de la turgencia en hojas, entre otros; que en una situación de déficit hídrico puede generar cambios irreversibles en la estructura de la planta y hasta causarle la muerte. Cuando el agua es limitante, en la mayoría de las plantas se produce pérdida de turgencia en los tejidos, lo que ocasiona una disminución en la expansión celular. Al ocurrir la pérdida de la turgencia se produce el cierre estomático, que reduce la concentración interna de CO₂, lo que a su vez repercute en la fotorrespiración. Del mismo modo, se puede ver afectada la síntesis de proteínas debido al estrés generado. La suma de todos estos sucesos influye en la productividad de la planta, las cuales resultan en una menor productividad bajo situaciones de estrés hídrico severo (Graciano, 2005). Un déficit

hídrico importante promueve una reducción en el porcentaje de materia seca total de la planta (Pandolfi et al., 2008; Klippel et al., 2014).

El coeficiente de transpiración es menor cuanto mejor sea la condición de crecimiento y el suministro de nutrientes y agua. A altos niveles de macronutrientes (N-P-K) en la planta, la pérdida de agua por evaporación resulta ser más baja (Mengel y Kirby, 2001). Además de ello, al tener nutrientes a disponibilidad, la planta invierte menor cantidad de asimilados en la distribución de materia seca, mejora el transporte de agua desde la raíz hacia la hoja por medio del xilema (conductividad hidráulica del xilema) y presenta una mejor capacidad de realizar ajuste osmótico (Graciano, 2005). Por lo tanto, en aquellas regiones en donde hay períodos de sequía o los suelos presentan baja capacidad de retención hídrica es importante que los regímenes de fertilización sean adaptados para reducir la demanda de agua por parte de la planta, (Battie-Laclau et al., 2014).

Las plantas son capaces de desarrollar diversos mecanismos que les permiten tolerar el estrés hídrico al cual se ven sometidas. Ciertos mecanismos de tolerancia para enfrentar cortos o largos periodos de estrés hídrico incluyen el desarrollo radical en profundidad, la disminución de pérdida de agua mediante el control en el cierre de los estomas, el ajuste osmótico, la biosíntesis de proteínas, la reducción del tamaño de la hoja o la caída de estas (Pardos, 2007). La implementación de muchos de ellos puede influir considerablemente en la productividad final de la plantación (Graciano, 2005).

Los suelos con textura arenosa no sólo presentan baja capacidad de retención hídrica, sino también bajo contenido de nutrientes, debido a la baja capacidad de intercambio catiónico y bajo contenido de materia orgánica, por lo cual es común encontrar deficiencias de macronutrientes como es el caso del K. A pesar de que este

elemento no forma parte de ningún compuesto orgánico, ni forma parte de ninguna función estructural en la planta; actúa en la activación de aproximadamente 50 enzimas, como las sintetasas, oxidorreductasas, deshidrogenasas, transferasas, quinasas y aldolasas, entre otras. Está involucrado en la síntesis de proteínas y por esta razón, las plantas que presentan bajo contenido de K tienen bajo contenido proteico y acumulan compuestos de bajo peso molecular como aminoácidos, amidas, aminas y nitratos (Silveira, 2000). Las plantas con niveles adecuados de K son, en cambio, más resistentes a la sequía y a las heladas ya que al entrar en el sistema metabólico celular intervienen en la regulación del potencial osmótico, controlando a su vez el contenido de agua interna de la planta (García et al., 2018).

Estudios realizados muestran que para la producción forestal de distintas especies de *Eucalyptus*, se observó que *Eucalyptus grandis* fue la especie más eficiente en la utilización de K, en suelos deficientes en este elemento, seguida en orden decreciente por *E. saligna*, *E. dunni*, *E. propinqua* y *E. robusta* (Silveira, 2000). Las dosis de K evaluada pueden variar entre 100 y 150 kg/ha dependiendo de las características edafoclimáticas del sitio y tipos de suelo (Neto et al., 1996; Gava et al., 1997; Gonçalves et al., 2008; Jesus et al., 2012; Barbosa et al., 2014).

En plantas bien nutridas de K, la tasa de transpiración no depende sólo del potencial osmótico del mesófilo de la célula, sino que también del control de la apertura y cierre de los estomas frente a una pérdida excesiva de agua en condiciones de déficit, lo que contribuye a la regulación del contenido de agua interna de la planta (Teixeira et al., 1995). Por todo esto es de interés conocer el efecto de la fertilización potásica en situaciones con déficit hídrico.

4.2. Objetivos

4.2.1. Objetivo General

Estudiar en condiciones controladas el rol de la adición de K como estrategia para la tolerancia de estrés hídrico en plantines de *Eucalyptus grandis*.

4.2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la respuesta de *E. grandis* a las dosis de K aplicadas.
- Evaluar el efecto de déficits hídricos sobre plantines de *E. grandis*.
- Evaluar el efecto de la fertilización con K en la respuesta de *E. grandis* bajo estrés hídrico.

4.3. Hipótesis

La hipótesis es que la fertilización potásica contribuye a mejorar la performance de plantines de *Eucalyptus grandis* sometidos a estrés hídrico, reflejada en la respuesta fisiológica y morfológica de las plantas.

4.4. Materiales y Métodos

Se realizó un ensayo en macetas con suelo del lote del ensayo del capítulo 3 de esta tesis. Los plantines de *Eucalyptus grandis* fueron provistos por la EEA INTA Concordia, los cuales tenían tres meses de edad, y provenían de semillas de huerto semillero clonal de dicha EEA (Material Básico Nro. 41E3066JE) que fueron trasplantados con raíz cubierta, en macetas de 4 litros.

Los tratamientos quedaron definidos por dos factores: 1-dosis de potasio (K) y; 2-niveles de contenidos hídricos del suelo. Las dosis de K utilizadas fueron 0g (K1); 0,5g (K2) y 1g (K3) de K en forma de Nitrato de potasio, correspondiendo con 1,29 g y 2,59 g. Se realizó una fertilización base con nitrógeno (N) y fósforo (P) con las mismas dosis aplicadas en el trabajo de Graciano (2005). La dosis utilizada de N fue 1g y la fuente utilizada fue Urea. Debido a que la fertilización de K incluía N, las dosis de N con fuente urea complementaron lo aplicado en el Nitrato de potasio. Así, 0, 63 g y 0,26 g de Urea en las dosis 0,5 y 1 g de Nitrato de potasio. El P se aplicó una dosis de 12 g de superfosfato triple (0-48-0) (5,76 g de P₂O₅). Los fertilizantes se aplicaron en el momento del trasplante.

K1: 0 g K + 5,76 g P + 0,46 g N

K2: 0,5 g K + 5,76 g P + 0,46 g N

K3: 1 g K + 5,76 g P + 0,46 g N

El factor contenido hídrico del suelo tuvo dos niveles: capacidad de campo (A1), y 40% de capacidad de campo (A2). Los contenidos hídricos fueron mantenidos durante los 56 días de ensayo. Así quedaron definidos los 6 tratamientos evaluados: K1A1, K2A1, K3A1, K1A2, K2A2, K3A2, con 15 repeticiones

4.4.1. Muestreo y determinaciones de Laboratorio

El suelo del ensayo fue caracterizado mediante la distribución del tamaño de partículas (Bouyoucos), el tipo textural, la densidad de partícula (método del picnómetro), el contenido de carbono orgánico (Walkley y Black, 1934) y el contenido de magnesio (Mg), calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu) del suelo (Absorción atómica) (Tabla 5.1).

Tabla 4.1. Caracterización de los suelos: distribución de tamaño de partículas (arena, limo, arcilla), tipo textural, densidad de partícula, carbono orgánico (CO) y concentración de nutrientes como: calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu).

Variables	Valores promedios
Arena (%)	88,72
Limo (%)	3,28
Arcilla (%)	8,00
Textura	Arenosa
Dr (g/cm ³)	2,34
CO (%)	0,96
Ca (Cmol _c /kg)	4,24
K (Cmol _c /kg)	0,35
Na (Cmol _c /kg)	0,13
Fe (Cmol _c /kg)	0,26
Mn (Cmol _c /kg)	0,13
Mg (Cmol _c /kg)	1,95

Las mediciones realizadas sobre los plantines al comienzo y al final del ensayo fueron: biomasa seca inicial y final, altura total, diámetro del tallo.

La biomasa seca inicial se midió en 15 plantas tomadas al azar antes del comienzo del ensayo y, la biomasa seca final se evaluó en todas las plantas al final del ensayo. El material se secó en estufa a 70°C hasta peso constante. Además, al final del

ensayo se identificaron los pesos por separado de la biomasa aérea (BA), identificando tallos y ramas, y hojas, y la biomasa radical (BR). De esta manera se pudo analizar la relación BA/BR.

La altura de las plantas se midió con cinta métrica (desde la base del tallo hasta la última hoja extendida de la parte superior de la planta) (Figura 4.1.). El diámetro de la planta a la altura del cuello (DAC) se midió en la base del tallo de la planta, utilizando un calibre. Para cada una de estas variables se estimó incremento relativo (IR) (Ecuación 5.1) (Hunt et al., 2003), para las los días: 7, 14, 21, 28, 35, 42, 48 de comenzado el ensayo.

$$IR (cm/mm) = \frac{(y_2 - y_1)}{y_1} \quad \text{Ecuación 5.1.}$$

Donde:

y_1 = variable de tamaño (altura o DAC) en el tiempo =1

y_2 = variable de tamaño (altura o DAC) en el tiempo = 2



Figura 4.1. Medición de la altura de las plantas

También se midió conductancia estomática (CE) a los 41, 49 y 56 días de iniciado el ensayo, utilizando un porómetro de flujo estacionario Steady State Porometer (LI-1600, Licor). La medición se realizó en la hoja superior completamente expandida de siete plantas seleccionadas al azar, en cada uno de los tratamientos.

Se midió el contenido relativo de agua (CRA) a los 31,38 y 51 días de iniciado el ensayo. Para ello se seleccionaron 7 plantas por tratamiento, se tomó una muestra de tejido foliar de una hoja de cada planta, se obtuvo su peso fresco y, posterior a ello se sumergió la muestra en agua destilada por aproximadamente 30 minutos y, luego, se pesó la muestra para obtener el peso saturado de la muestra. Luego se determinó el peso seco en estufa a 70°C hasta peso constante.

El CRA se obtiene a partir de la siguiente Ecuación 5.2 (Argentel et al., 2006):

$$CRA (\%) = \left[\frac{(PF - PS)}{(PSat - PS)} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación 5.2.}$$

Donde:

PF = peso fresco;

PS = peso seco;

$PSat$ = peso saturado.

Al finalizar el ensayo se midió el área foliar (AF) en 7 plantas tomadas al azar de cada uno de los tratamientos con un medidor de área foliar marca LICOR modelo LI-3100.

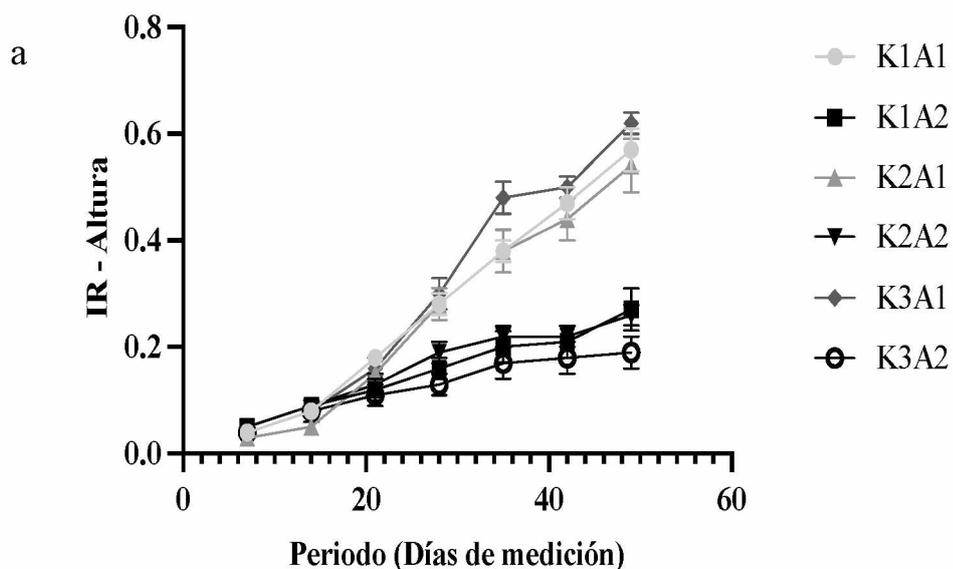
4.5. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante análisis de la varianza (Snedecor y Cochran, 1980). Cuando se encontraron efectos significativos, se utilizó el test de diferencias mínimas significativas (*least significant difference* –LSD-) para comparar las medias de los tratamientos (Infostat/P v1.1, 2002).

4.6. Resultados

4.6.1. Efecto de la fertilización y el contenido hídrico del suelo sobre *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden.

En la Figura 4.2.a se observa que para la altura no hubo interacción entre las dosis K*contenido hídrico, así como tampoco se encontró interacción entre las dosis de K aplicadas. En aquellos tratamientos que no se encontraban limitados en el contenido hídrico, al final del ensayo, se alcanzó en promedio 0,59 cm de altura y de 0,33 cm de DAC (Figura 4.2.b). Aquellos tratamientos que presentaron restricciones en el contenido hídrico (A2) mostraron los menores incrementos relativos en altura desde los 21 días de medición, hasta los 56 días, período en el que finalizó el ensayo con un IR promedio de 0,24 cm de altura y de 0,08 cm de DAC.



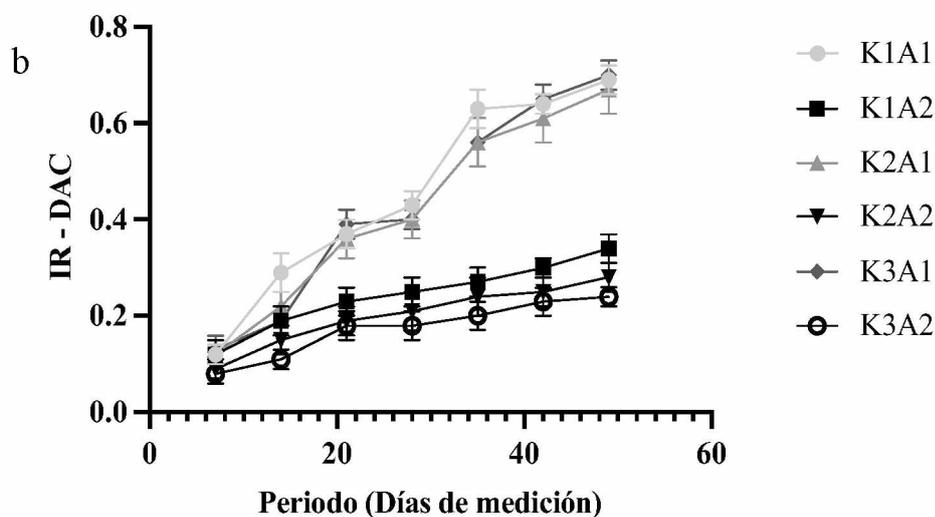


Figura 4.2. Incremento relativo (IR) en: (a) altura y (b) diámetro a la altura del cuello (DAC) en plantines de *Eucalyptus grandis*, bajo diferentes dosis de potasio (1:0, 2:1,29, 3:2,59 g K) y de contenido hídrico (A1: capacidad de campo y A2: 40% menos de CC).

En la evaluación del IR para la medición del DAC (Figura 4.2.b.) se encontró que los tratamientos sin limitaciones en el contenido hídrico del suelo presentaron los mayores incrementos relativos en diámetro (al igual que en altura), alcanzando un incremento promedio de 0,33 cm, a partir de los 14 días de iniciado el ensayo, a diferencia de los tratamientos limitados en su contenido hídrico, los cuales presentaron siempre los menores incrementos relativos, con un promedio de 0,08 cm estimados a partir del DAC.

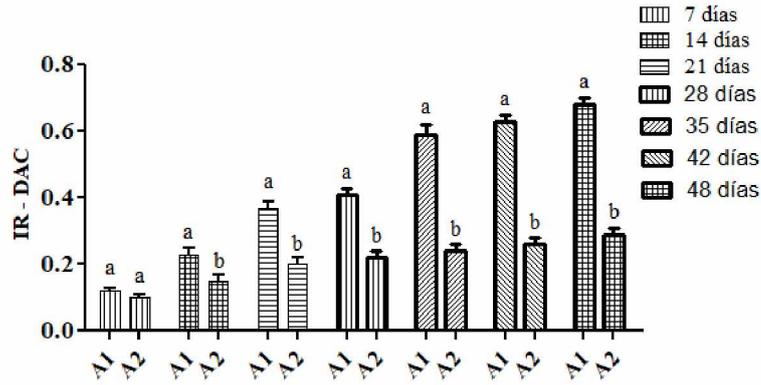


Figura 4.3. Incremento relativo (IR) en diámetro a la altura del cuello (DAC) en plantines de *Eucalyptus grandis*, bajo diferentes condiciones de contenido hídrico (1: capacidad de campo y 2: 40% menos de CC). Letras distintas indican diferencias significativas entre el factor contenido hídrico, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

Debido a las diferencias observadas en los tratamientos, se procedió a evaluar estadísticamente los resultados obtenidos y las diferencias presentadas debido a las limitaciones hídricas generadas, es así que se muestra, en la figura 4.3. que el IR del DAC y la figura 4.4. con el IR en Altura. En ambos casos se muestra que los mayores incrementos se obtuvieron sobre los tratamientos A1, a partir de los 14 días de medición (IR - DAC), o los 21 días de medición (IR - Altura) hasta finalizar el período de medición.

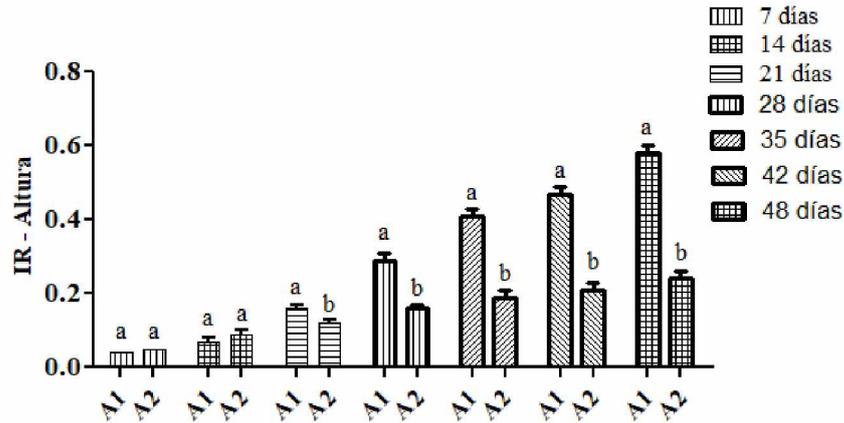


Figura 4.4. Incremento relativo (IR) en altura, en plantines de *Eucalyptus grandis*, bajo diferentes dosis de contenido hídrico (1: capacidad de campo y 2: 40% menos de CC). Letras distintas indican diferencias significativas entre el factor contenido hídrico, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

4.6.2. Biomasa de plantines de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden bajo diferentes tratamientos de fertilización y contenidos hídricos.

La evaluación de la biomasa de cada compartimento no presentó interacción dosis K*contenido hídrico. Para la biomasa de tallos y ramas, hojas y raíces, se observaron reducciones en su peso cuando el contenido hídrico se mantuvo al 40 % de CC sin importar la fertilización potásica (Figura 4.5.). La biomasa seca fue superior en plantas que no se encontraban sometidas a un riego restrictivo (A1), las cuales tuvieron mayor biomasa, a diferencia de aquellas sometidas a un déficit hídrico (A2). La fertilización produjo una mayor acumulación de materia seca en las plantas no estresadas (Figura 4.5.).

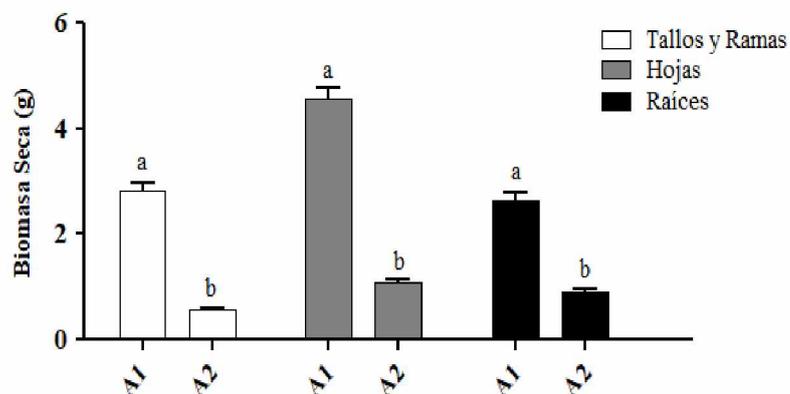


Figura 4.5. Partición de la Biomasa seca de tallos y ramas, hojas y raíces en plantines de *Eucalyptus grandis*, bajo diferentes niveles de contenido hídrico. Contenido hídrico del suelo a capacidad de campo (A1), contenido hídrico a menos del 40% de capacidad de campo (A2). Letras distintas indican diferencias significativas entre el factor contenido hídrico, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

La biomasa aérea bajo CC en promedio fue de 7,40 g y para las plantas mantenidas a 40% CC fue de 1,66 g. La biomasa radical fue de 2,65 g y 0,91 g para macetas a CC y 40% CC, respectivamente (Figura 5.5.). La relación BA/BR expresa el balance entre la parte transpirante y la parte que absorbe de la planta. La BA/BR (Figura 4.6.) presentó interacción entre la dosis K*contenido hídrico y fue mayor para los tratamientos K1A1 (0,66g) y K3A1 (0,65g), seguido de los Tratamientos K2A1 (0,55g) y el tratamiento K3A2 (0,54g). Los tratamientos K1A2 (0,49g) y el tratamiento K2A2 (0,39g) presentaron una menor relación BA/BR.

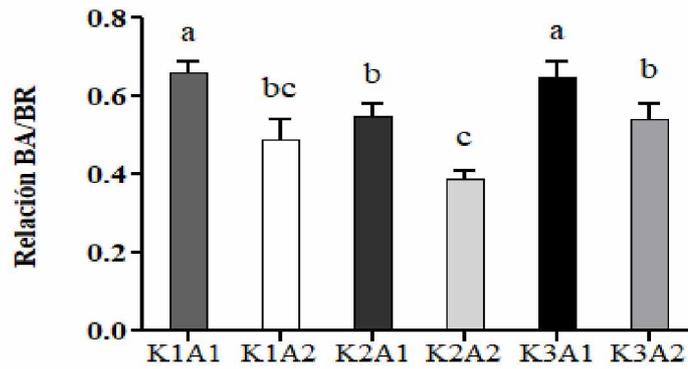


Figura 4.6. Relación de la Biomasa Aérea (BA) y Biomasa Radical (BR) en plantines de *Eucalyptus grandis*, bajo diferentes dosis de potasio (1:0, 2:1,29, 3:2,59 g K) y de contenido hídrico (1: capacidad de campo y, 2: 40% menos de CC). Letras distintas indican diferencias significativas para cada tratamiento, con el test de LSD *Fisher* ($P < 0,05$).

El análisis del AF al final del ensayo (Figura 4.7.) también muestra que sólo se presentaron diferencias significativas entre los niveles de contenido hídrico aplicados. Aquellos tratamientos sin restricciones hídricas (A1) mostraron una mayor área foliar (868,03 cm²/g) que aquellos que sí presentaron una restricción hídrica (A2) (193,76 cm²/g).

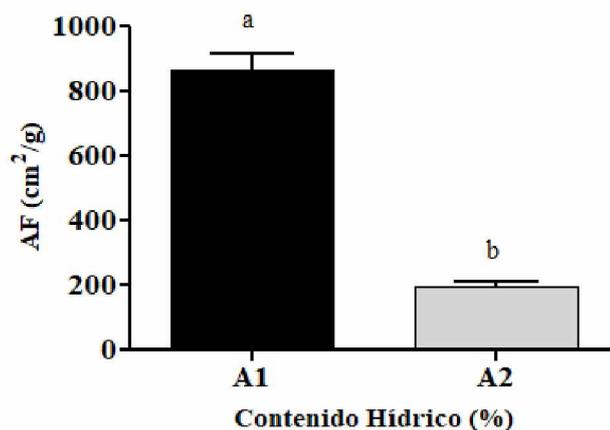


Figura 4.7. Área foliar (AF) en plantines de *Eucalyptus grandis*, bajo dos niveles de contenido hídrico: contenido hídrico a capacidad de campo (A1), contenido hídrico a 40% de capacidad de campo (A2). Letras distintas indican diferencias significativas para cada contenido hídrico, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

4.6.3. Evaluación de la conductancia estomática y el contenido relativo de agua de *Eucalyptus Grandis* Hill Ex Maiden.

En los análisis realizados para estas variables se encontraron diferencias significativas entre los niveles de contenido hídrico debido al riego diferencial aplicado a las plantas. Existe una mayor conductancia estomática y un mayor contenido relativo

de agua (Figura 4.8. a y b.) en aquellas plantas que no se encontraron limitadas por el agua (A1), en relación a aquellas que si se encuentran bajo un déficit a un 40% de agua a capacidad de campo (A2).

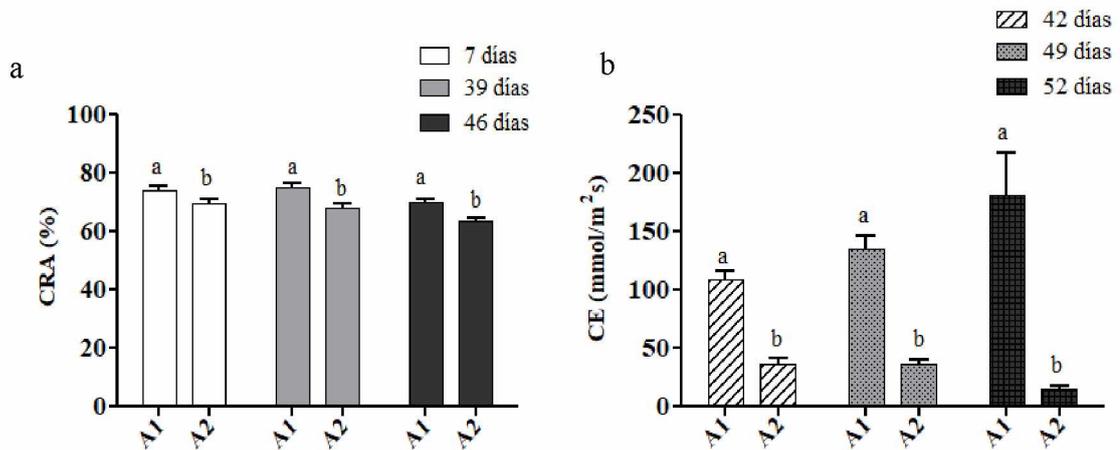


Figura 4.8. (a) Contenido relativo de agua (CRA) y (b) Conductancia estomática (CE) en plantines de *Eucalyptus grandis*, evaluados en tres momentos durante el desarrollo del ensayo. Agua a capacidad de campo (A1), agua a menos del 40% de capacidad de campo (A2). Letras distintas indican diferencias significativas para cada contenido hídrico dentro de cada fecha, con el test de LSD Fisher ($P < 0,05$).

4.7. Discusión

El crecimiento y los patrones de asignación de biomasa en las plantas es afectado tanto por factores intrínsecos de la especie, así como por las condiciones ambientales durante su desarrollo (García Castro et al., 2018). En este caso, la medida de la tasa relativa de crecimiento definida como la ganancia de biomasa por unidad de biomasa y tiempo evaluada (Hoffmann y Poorter, 2002; Alameda y Villar, 2009), indicó una menor ganancia de biomasa registrada en altura o DAC, a partir de los 21 o 14 días respectivamente, en aquellas plantas que se encontraban sometidas a estrés hídrico (Figura 4.3. y 4.4.). El contenido hídrico del suelo limitó el crecimiento relativo en altura y en diámetro durante el periodo de estudio, esto también fue observado por Whitehead y Beadle (2004), Almeida et al. (2007) y Tafur et al. (2017) quienes indican que *E. grandis* acumula mayor biomasa cuando tiene una adecuada disponibilidad de agua. En ese sentido, podemos indicar que la adición de K como nutriente que mejoraría la performance de *E. grandis* frente al estrés hídrico, no demostró respuestas, frente al nivel de estrés generado. Las diferencias en incremento de altura y/o DAC, encontradas, respondieron a las limitaciones por el contenido de agua.

La partición de materia seca de *Eucalyptus grandis* fue considerablemente menor en las plantas que se encontraban sometidas a una reducción del contenido de agua en el suelo (Figura 4.5.), lo cual indicó que no hubo respuesta al K en el estrés hídrico bajo el cual se realizó el ensayo. Los resultados obtenidos muestran que la fertilización es más efectiva bajo condiciones que no expongan a las plantas a estrés hídrico (Sands y Mulligan, 1990; Stoneman et al., 1997; Graciano, 2005). A pesar de haberse dado la adición de K al suelo, con la intención de que *Eucalyptus grandis* enfrentara en mejor forma el estrés hídrico provocado, no se logró mejorar la partición

de materia seca de aquellas plantas que se encontraban estresadas, esto se debe probablemente a que el abastecimiento de nutrientes también disminuye, con una disminución en el contenido relativo de agua, en suelos de textura gruesa, en donde se requiere de una mayor proporción de raíces para maximizar la extracción potencial de agua desde el suelo, que en suelos bien estructurados (Arya et al., 1999; Graciano, 2005).

El análisis del balance que existe entre la parte transpirante de la planta y la parte absorbente (relación BA/BR) demostró que, en general, se dio un incremento en aquellas plantas que no se encontraban limitadas en cuanto al recurso hídrico (Figura 4.6.), sobre aquellas plantas cuyo tratamiento implicaba la reducción del contenido de agua en el suelo, lo que evidentemente limitó el incremento en biomasa de las plantas. En este caso, por ser un suelo de textura gruesa, la respuesta de la planta al agregado de nutrientes y de agua se vio comprometida frente al estrés hídrico generado, afectando el desarrollo de una mayor proporción de raíces, la cual es requerida para maximizar la extracción potencial de agua desde el suelo (Graciano, 2005). El análisis de este parámetro resulta de gran importancia cuando las plantas son sometidas a condiciones medioambientales limitantes, las cuales pueden influir sobre la supervivencia del primer año (Birchler et al., 1998). Actualmente no existe un valor que permita caracterizar esta relación para *E. grandis*, sin embargo Gil y Pardos (1997) desarrollaron un valor para *Pinus halepensis*.

En el caso del incremento del AF (Figura 5.7.), este se vio afectado en un 78% de las plantas que se encontraban sometidas a un déficit hídrico. Esta reducción del área foliar es asociada con una menor transpiración, como lo indican Osorio et al., (1998); Pita y Pardos (2001), Graciano (2005) y Lambers et al., 2008, quienes mencionan que

este mecanismo ayuda a la planta a absorber agua desde suelos con menor potencial hídrico, y así mantener la turgencia necesaria para mantenerse fisiológicamente activas.

En la evaluación del CRA de las plantas (Figura 4.8.a), se encontraron valores similares entre las plantas que se encontraban bajo el mismo tratamiento hídrico, obteniéndose los menores valores en los tratamientos de estrés hídrico, lo que indica que bajo ese nivel de estrés, disminuyó la eficiencia en el uso del agua por parte de la planta, resultado que también fue demostrado por Argente et al., (2006). En el caso de la conductancia estomática (Figura 4.8. b), se obtuvieron valores mucho menores en las plantas con una reducción de su contenido hídrico, en comparación de aquellas plantas que no se encontraban limitadas. Estas reducciones fueron acentuándose a medida que transcurrió el periodo de medición, de la misma forma fueron haciéndose mayores en las plantas no estresadas, lo que permite observar una relación inversa entre los diferentes contenidos de humedad y la respuesta de la CE en las plantas. Un patrón similar en la reducción de la CE fue encontrado por Sasse y Sands (1996) y Graciano (2005) quienes también observaron una reducción en la conductancia estomática debida a una reducción en la disponibilidad de agua en el suelo. Las condiciones de baja disponibilidad de agua en el suelo generan una mayor dificultad para absorber nutrientes, la absorción de nutrientes depende de la demanda de la planta y de la habilidad del suelo para abastecer la demanda (Nambiar y Sands, 1993), la baja disponibilidad de otros nutrientes en el suelo arenoso pudo haber contribuido a eliminar los efectos benéficos de la fertilización con N, P, K en este tipo de suelo (Graciano, 2005).

4.8. Conclusión

La fertilización con K a plantines de *Eucalyptus grandis* expuesto a un estrés hídrico de 40% - CC, en un suelo arenoso, no mostró mejorar la performance en variables medidas sobre la biomasa o morfología de las plantas así como tampoco en variables fisiológicas, por lo cual se rechaza la hipótesis planteada.

5. Capítulo.

Conclusión General

La producción de plantaciones forestales es una actividad que ha ido en aumento en los últimos años en diversos países y regiones, incluyendo la Mesopotamia Argentina. Un adecuado manejo silvicultural de las plantaciones puede aumentar las ventajas en la producción y fomentar buenas prácticas en relación al ambiente en el cual se desarrollan. Estos manejos, en general, se adecúan de acuerdo a las limitantes en cada suelo. Algunos de los manejos tienen que ver con la preparación adecuada del suelo y otros con la fertilización. Estos manejos buscan permitir obtener el ambiente ideal para el desarrollo radicular de la planta y el medio con disponibilidad de los elementos necesarios en cada etapa de su desarrollo. El suelo es un componente importante de los agroecosistemas debido a que son parte de procesos fundamentales como es el caso de la absorción de nutrientes, la descomposición de material vegetal o animal y la disponibilidad de agua. Además de ello, los suelos cumplen una función estructural importante brindando anclaje, agua y otros nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas.

El desarrollo de esta tesis mostró los resultados obtenidos de la implementación de distintas prácticas de manejo de suelo, que tenían como fin potenciar la productividad de *Eucalyptus grandis* cuando se encuentra plantado en suelos con limitantes físicas, de retención hídrica y capacidad de intercambio catiónica, las cuales pueden generar impedimentos para el adecuado desarrollo de las plantas. Fue así como en el caso de los suelos arcillosos, muy utilizados para el establecimiento de plantaciones forestales y que naturalmente pueden presentar condiciones físicas que generen impedimentos mecánicos y de desarrollo radical para las plantas, los resultados mostraron que la formación de camellones en la preparación del suelo para *Eucalyptus grandis* contribuye a mejorar la performance de los árboles en cuanto a las variables dasométricas evaluadas. En términos de residualidad la mayoría de las variables

hidrofísicas evaluadas mostraron diferencias significativas en favor de los camellones. A su vez, se observó que las variables dasométricas e hidrofísicas se hallaron correlacionadas.

En cuanto al desarrollo de la especie en suelos arenosos con bajo contenido de nutrientes y una limitada capacidad de retención y almacenamiento hídrico se obtuvo que, para la fertilización con N, P y K en el campo, sólo hubo respuesta en la interacción P*K, mostrando reducciones en las respuestas a las mayores dosis de ambos nutrientes.

En el ensayo de fertilización realizado en invernadero, y la evaluación de respuesta frente a déficit hídrico, los plantines respondieron al contenido hídrico, no mostrando respuesta en términos de mejorar la performance en biomasa o variables fisiológicas con la fertilización de K.

6. Bibliografía

Aguerre, M., Carpineti, L., Dalla Tea, F., Denegri, G., Frangi, J., Garran, S., Gimenez, E., Glade, J., Larocca, L., Marco, M., Mendonza, L., Pujato, J., Rembado, G., Sanchez, M., Vaccaro, N., 1995. Manual para productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina, Grupo Forestal, EEA. INTA. Concordia. ed. Artesania Gráfica, Concordia, Entre Ríos, Argentina.

Aguirre, D., Ordoñez, Y., Navia, J., 2010. Influencia de diferentes usos en sistemas productivos sobre la dinámica y movimiento del agua en el suelo del altiplano de pasto, Departamento de Nariño, Colombia, in: XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Nariño, Colombia, p. 12.

Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. IEEE transactions on automatic control, 19(6), 716-723.

Alameda, D., Villar, R., 2009. Moderate soil compaction: Implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. Soil Tillage Res., Contains papers from HighLand 2006: Land Degradation and Soil and Water Conservation in Tropical Highlands, Mekelle, Ethiopia, 21-25 September 2006 103, 325-331.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.029>

Albaugh, T.J., Rubilar, R.A., Fox, T.R., Allen, H.L., Urrego, J.B., Zapata, M., Stape, J.L., 2015. Response of *Eucalyptus grandis* in Colombia to mid-rotation fertilization is dependent on site and rate but not frequency of application. For. Ecol. Manag. 32.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.030>

- Almeida, A.C., Soares, J.V., Landsberg, J.J., Rezende, G.D., 2007. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. *For. Ecol. Manag.* 251, 10–21.
- Alvarez, C., Torres Duggan, M., Chamorro, E., Ambrosio, D., Taboada, M., 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos 27, 159–169.
- Aparicio, J.L., Larocca, F., Dalla Tea, F., 2005. Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*.
- Aparicio, J.L., Maggio, A., 2018. Respuesta a la fertilización con NPK en 5 clones de *Eucalyptus grandis* en planicies arenosas de Corrientes.
- Aparicio, J.L., Monticelli, C., Ghio, A., 2003. Fertilización de *Eucalyptus grandis* con NPK y micronutrientes: respuestas en suelos arenosos del sudoeste de Corrientes.
- Argentel, L., González, L.M., Ávila, C., Aguilera, R., 2006. Comportamiento Del Contenido Relativo De Agua Y La Concentración De Pigmentos Fotosintéticos De Variedades De Trigo Cultivadas En Condiciones De Salinidad. *Cultiv. Trop.* 27, 49–53.
- Arya, L.M., Leij, F.J., Shouse, P.J., van Genuchten, M.T., 1999. Relationship between the hydraulic conductivity function and the particle-size distribution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63, 1063–1070. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351063x>
- Battie-Laclau, P., Laclau, J. P., Domec, J. C., Christina, M., Bouillet, J. P., de Cassia Piccolo, M., ... & Nouvellon, Y. (2014). Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. *New phytologist*, 203(2), 401-413.
- Battie-Laclau, P., Delgado-Rojas, J. S., Christina, M., Nouvellon, Y., Bouillet, J. P., de Cassia Piccolo, M., ... & Laclau, J. P. (2016). Potassium fertilization increases water-use

efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management*, 364, 77-89.

Barbosa, B. M., Colodette, J. L., Cabral, C. P. T., Gomes, F. J. B., & Silva, V. L. (2014). Effect of fertilization on the quality of the *Eucalyptus* spp. wood. *Scientia Forestalis*, 42(101), 29-39.

Birchler, T. al, Royo, A., Pardos, M., 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *For. Syst.* 7, 109–121.

Bonomelli, C., Suarez, D., 1999. Fertilización del eucalipto. Acumulación de nitrógeno, fósforo y potasio. *Cienc. E Investig. Agrar.* 26, 9.

Brandstatter, G.M.F., 2004. Evaluación de una fertilización en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. de uno y dos años de edad, Valdivia. (Tesis de Grado). Universidad Austral de Chile, Valdivia.

Britos J., Leguizamón A., 2013. Manual de Plantaciones Forestales. Técnicas de instalación y manejo.

Cabrera, A. L. (1971). Sociedad Argentina de Botánica. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, 14, 1-2.

Cakmak, I., 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168, 521–530. <https://doi.org/10.1002/jpln.200420485>

Carimentrand, J., Lugo, L., Lozada, J., 2002. Efectos inducidos en los suelos, por las plantaciones de Eucalipto en el Estado Portuguesa, Venezuela. *Rev. For. Latinoam.* 17, 99–117.

Ceacero, C. J., Díaz-Hernández, J. L., del Campo, A. D., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2012). Evaluación temprana de técnicas de restauración forestal mediante fluorescencia

de la clorofila y diagnóstico de vitalidad de brinzales de encina (*Quercus ilex* sub. *ballota*). *Bosque (Valdivia)*, 33(2), 191-202.

Cerana, J., Wilson, M., Pozzolo, O., De Battista, J.J., Rivarola, S., Díaz, E., 2005. Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un Vertisol. *Estud. Zona No Saturada Suelo* 7, 159–163.

Chaves, E., Fonseca, W., 1991. Teca: *Tectona grandis*: L.f. especie de árbol de uso múltiple en América Central. *Bib. Orton IICA / CATIE*.

Cromer, R.N., Cameron, D.M., Rance, S.J., Ryan, P.A., Brown, M., 1993. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 1. Biomass accumulation. *For. Ecol. Manag.* 62, 211–230. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90051-N](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90051-N)

Dalla Tea, F., 1995. Nuevas alternativas de plantación de eucalipto en la zona de Concordia.

Dalla Tea, F., Larocca, F., 1998. Establecimiento de plantaciones forestales en la costa del río Uruguay. XIII Jorn. For. Entre Ríos Concordia Entre Ríos.

De Battista, J.J., 2004. Manejo de Vertisoles en Entre Ríos. *Rev. Científica Agropecu. - UNER* 8, 37–43.

Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>

Dorner, J., Dec, D., 2007a. La permeabilidad del aire y conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización funcional de los poros del suelo. *Rev. Cienc. Suelo Nutr. Veg.* 7, 1–13. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912007000200001>

Dorner, J., Dec, D., 2007b. La permeabilidad del aire y conductividad hidráulica saturada como herramienta para la caracterización funcional de los poros del suelo. *Rev. Cienc. Suelo Nutr. Veg.* 7, 1–13. <https://doi.org/10.4067/S0718-27912007000200001>

- Dörner, J., Horn, R., 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselian moraine region in N Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 213–220. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521844>
- du Toit, B., 2008. Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of *Eucalyptus grandis* in South Africa. *For. Ecol. Manag.* 255, 2324–2336. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.037>
- du Toit, B., Smith, C.W., Little, K.M., Boreham, G., Pallett, R.N., 2010. Intensive, site-specific silviculture: Manipulating resource availability at establishment for improved stand productivity. A review of South African research. *For. Ecol. Manag., Productivity in Tropical Plantations* 259, 1836–1845. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.015>
- FAO, 2020. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020, Principales resultados. FAO, Roma.
- Fernández, R.A., Lupi, A.M., Martiarena, R., Real De Azua, M., Azame, S., Reis, H., Reboratti, H., 2003. Efectos de la preparación del sitio y fertilización sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis*. *Congr. Argent. Ing. Rural* 8.
- Ferrándiz, A.S., Solbes, M.J.L., Esteve, A.E., Morales, M.A.R., Navarrete, E.D.-S., 2006. Effects of site preparation with micro-basins on *Pinus halepensis* Mill. afforestations in a semiarid ombroclimate. *Ann. For. Sci.* 63, 15–22.
- Flores, M., 2016. Información técnica de la producción forestal de Entre Ríos. Entre Ríos For. URL <http://entrieriosforestal.blogspot.com.ar/p/informacion-tecnica.html>
- Gaitán, J.J., Larocca, F., Dalla Tea, F., 2004. Fertilización de *Eucalyptus grandis*: Dinámica de la respuesta durante la rotación comercial.
- García Castro, K.D., Romo-Campos, R. de L., Pereira, C.J., Gómez-Rubio, R., García Castro, K.D., Romo-Campos, R. de L., Pereira, C.J., Gómez-Rubio, R., 2018. Tasa relativa de crecimiento en plántulas de dos poblaciones de *Magnolia pugana*

(Magnoliaceae) en distintos niveles de luz y fertilidad del suelo. *Rev. Biol. Trop.* 66, 622–633. <https://doi.org/10.15517/rbt.v66i2.33394>

García, M. de los Á., De La Peña, C., 2013. Respuesta a la fertilización de otoño en plantaciones de eucalipto en Entre Ríos. *Quebracho* 21(1,2), 10.

García, M. de los Á., de La Peña, C., Bedendo, D., Lupi, A.M., 2020. Tecnologías para el establecimiento de plantaciones de eucalipto en Entre Ríos. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.

Gava, J. L. (1997). Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. *Série técnica IPEF*, 11(30), 89-94.

GeoINTA, 2014. Cartas de Suelo de Entre Ríos [www Document]. Cartas Suelo Entre Ríos. URL <http://www.geointa.inta.gob.ar/2014/04/22/cartas-de-suelos-de-entre-rios/>

Gil, L., Pardos, J.A., 1997. Aspectos funcionales del arraigo. La calidad fisiológica de la planta forestal, in: Cuadernos de la SECF. Presented at the Reunión de Madrid, Madrid, España, pp. 27–33.

Gonçalves, J.L. de M., Stape, J.L., Laclau, J.-P., Smethurst, P., Gava, J.L., 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *For. Ecol. Manag.* 193, 18.

Gonçalves, J. D. M., Stape, J. L., Laclau, J. P., Bouillet, J. P., & Ranger, J. (2008). 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*, 70(2), 105-118.

Gonçalves, J.L.M., 2011. Fertilização de Plantações de Eucalipto. Presented at the II Encontro Brasileiro de Silvicultura. IPEF, Campinas, pp. 85–114.

- Goya, J., Frangi, J., Dalla Tea, F., Marco, M.A., Larocca, F., 1997. Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *eucalyptus grandis* en el NE de la provincia de Entre Ríos.
- Graciano, C., 2005. Productividad temprana de *Eucalyptus* con diferentes disponibilidades de nutrientes y agua (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina.
- Graciano, C., Goya, J., Arturi, M., Burns, S., Pérez, C., 2015. Fertilización de *Eucalyptus grandis* en el NE de Entre Ríos: resultado al turno y algunas implicancias para el manejo de las plantaciones.
- Graciano, C., Goya, J., Frangi, J., Guiamét, J., 2006. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis*. *For. Ecol. Manag.* 9.
- Graciano, C., Guiamét, J., Goya, J., 2005. Impact of nitrogen and phosphorus fertilization on drought responses in *Eucalyptus grandis* seedlings. *For. Ecol. Manag.* 10.
- Granados-Sánchez, D., López-Ríos, G.F., 2007. Fitogeografía y ecología del género *Eucalyptus*. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Ambiente* 13, 143–156.
- Guarnaschelli, A., Lupi, A., Oberschelp, J., 2017. Fertilización inicial en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en suelos arenosos: crecimiento, supervivencia y tolerancia a heladas 5.
- Hallett, P.D., Young, I.M., 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate-induced microbial activity. *Eur. J. Soil Sci.* 50, 35–40. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00214.x>

- Hernández, R.J., Rodas, C.A., Ospina, C.M., Urrego, J.B., Godoy, J.A., Aristizábal, F.A., Osorio, Ó.I., Riaño, N.M., 2006. El Eucalipto. Guías Silvic. Para El Manejo Especies For. Con Miras Prod. Madera En Zona Andina Colomb. 53.
- Hoffmann, W.A., Poorter, H., 2002. Avoiding bias in calculations of relative growth rate. *Ann. Bot.* 90, 37–42. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf140>
- Hossne, A., Cristopher, J., Paredes, G., Carvajal, E., Santaella, E., Malaver, J., Cova, A., 2003. Resistencia terramecánica en función de la humedad edáfica de un suelo ultisol de sabana del estado Monagas, Venezuela. *Bioagro* 15, 173–181.
- Hossne, G., Américo, J., 2008. La densidad aparente y sus implicaciones agrícolas en el proceso expansión/contracción del suelo. *Terra Latinoam.* 26, 195–202.
- Hunt, R., Thomas, B., Murphy, D.J., Murray, D., 2003. Growth analysis, individual plants. *Encycl. Appl. Plant Sci.* 2, 579–588.
- Ibañez, C., Nuñez, P., Pezzutti, R., Rodríguez, F., 2004. Efectos de la roturación del suelo y fertilización con fósforo en el crecimiento inicial de plantaciones de *Pinus taeda*, en suelos rojos del noreste de la provincia de Corrientes, Argentina. *Bosque, Nota Técnica* 25, 8.
- Illston, B., Basara, J., 2002. A Soil Moisture Analysis of the Drought Conditions using the Oklahoma Mesonet. Presented at the 13th Conference on Applied Climatology, Portland, Oregon, p. 5.
- Jesus, C. M. D., Miguel, E. P., Leal, F. A., & Imaña Encinas, J. (2012). Avaliação de diferentes hipsômetros para medição da altura total em um povoamento clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.
- Karlsson, C., & Örlander, G. (2002). Mineral nutrients in needles of *Pinus sylvestris* seed trees after release cutting and their correlations with cone production and seed weight. *Forest Ecology and Management*, 166(1-3), 183-191.

- Klippel, V. H., Pezzopane, J. E. M., Pezzopane, J. R. M., & Toledo, J. V. (2014). Impacto da deficiência hídrica no crescimento inicial de eucalipto. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, 23(1), 48-59.
- Klute, A., Dirksen, C., 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. *Methods Soil Anal. Part 1—physical Mineral. Methods* 687–734.
- Kolesnikov, V.A., 1971. The root system of fruit plants. *Root Syst. Fruit Plants*.
- Kraemer, F. B. (2015). Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento hidro-físico y estructural en suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa. Universidad de Buenos Aires.
- Lal, R., 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Soil Management Support Services. Soil Conservation Service, Ohio, EE.UU.
- Lambers, H., Chapin III, F.S., Pons, T.L., 2008. Plant physiological ecology, Second Edition. ed. Springer Science & Business Media.
- Larocca, F., Dalla Tea, F., Aparicio, J.L., 2004. VII Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos Forestadores en Entre Ríos Y Corrientes.
- Le Bissonnais, Y. L. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil science*, 47(4), 425-437.
- Lin HS, McInnes KJ, Wilding LP, Hallmark CT (1999) Effects of soil morphology on hydraulic properties II. Hydraulic pedotransfer functions. *Soil Sci Soc Am J* 63(4):955–961. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.634955x>

- Little, K.M., Van Staden, J., 2003. Interspecific competition affects early growth of a *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* hybrid clone in Zululand, South Africa. *South Afr. J. Bot.* 69, 505–513.
- Littell, R. C., Henry, P. R., & Ammerman, C. B. (1998). Statistical analysis of repeated measures data using SAS procedures. *Journal of animal science*, 76(4), 1216-1231.
- Löf, M., Dey, D.C., Navarro, R.M., Jacobs, D.F., 2012. Mechanical site preparation for forest restoration. *New For.* 43, 825–848. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9332-x>
- López, A.J., 2015. Comportamiento de clones de *Eucalyptus grandis* del INTA en plantaciones en vertisoles del centro-sur de la provincia de Corrientes. Argentina. *Cienc. E Investig. For.* 21, 27–36.
- Lopez, A.J., 2011. *Eucalyptus grandis* en el sudeste de Corrientes: propiedades físicas y químicas del suelo relacionadas con la producción volumétrica. Presented at the XXV Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Entre Ríos, Argentina, pp. 1–7.
- MAGyP, 2019. Plan Estratégico Foresto-industrial Argentina 2030 (Plan Estratégico Nacional). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Argentina.
- Malavolta, E., 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações/Eurípedes Malavolta, Godofredo Cesar Vitti, Sebastião Alberto de Oliveira.—2. ed., ver. e atual. Piracicaba Potafos, FA, Facultad de Agronomía. 319.
- Martiarena, R., 2003. Efectos de la preparación del sitio y fertilización sobre el crecimiento de *Eucalyptus grandis*. Presented at the Congreso Argentino de Ingeniería Rural 2003., Balcarce, Argentina, p. 6.
- Martínez González, I., Ovalle, C., Uribe, H., Prat, C., Del Pozo, A., Valderrama, N., Ruíz, G., 2015. Establecimiento de especies arbóreas de uso agroforestal mediante técnicas conservacionistas en condiciones de secano. pp. 258–262.

- Martínez-González, F., Sosa-Pérez, F., Ortiz-Medel, J., 2010. Comportamiento de la humedad del suelo con diferente cobertura vegetal en la Cuenca La Esperanza. *Tecnol. Cienc. Agua* 1, 89–103.
- Medina-Méndez, J., Volke-Haller, V., Galvis-Spínola, A., Cortés-Flores, J.I., Santiago-Cruz, M. de J., 2017. Incremento de la materia orgánica del suelo sobre el rendimiento del mango en luvisoles, Campeche, México. *Agron. Mesoam.* 28, 499–508. <https://doi.org/10.15517/ma.v28i2.22236>
- Mengel, K., & Kirkby, E. A. (2012). *Principles of plant nutrition*. Springer Science & Business Media.
- Mohieddinne, H., Brasseur, B., Spicher, F., Gallet-Moron, E., Buridant, J., Kobaissi, A., Horen, H., 2019. Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *For. Ecol. Manag.* 449, 117472. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117472>
- Nambiar, E.S., Sands, R., 1993. Competition for water and nutrients in forests. *Can. J. For. Res.* 23, 1955–1968. <https://doi.org/10.1139/x93-247>
- Navarro Cerrillo, R.M., Campo García, A.D. del, Cortina, J., 2006. Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta.
- Nebel, B.J., Wright, R.T., 1999. *Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible*, Sexta edición. ed. Pearson educación, México, D.F.
- Neto, A. F., Barros, N. F., Godoy, M. F., & Novais, R. F. (1996). Eficiência nutricional de mudas de Eucalyptus em relação a fósforo. *Revista Árvore*, 20, 17-28.
- Norzagaray Campos, M., Muñoz Sevilla, P., Llana, C.O., Capurro Filigraso, L., 2006. Materia orgánica y su relación con la humedad del suelo en el Valle de Guasave, Sinaloa, México, in: *Actas INAGEQ*. México, pp. 63–63.

- Orellana, I., 2011. Comparación de dos métodos para la medición de... - Google Académico (Licenciatura). Universidad Austral de Chile, Chile.
- Osorio, J., Osorio, M.L., Chaves, M.M., Pereira, J.S., 1998. Water deficits are more important in delaying growth than in changing patterns of carbon allocation in *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiol.* 18, 363–373.
- Palacios Rodríguez, G., 2015. Influencia de la fecha de plantación, la preparación del terreno y la calidad de planta en repoblaciones forestales de pino piñonero (*Pinus pinea* L.) y encina (*Quercus ilex* L.) en ámbito mediterráneo (Tesis Doctoral). Universidad de Córdoba, Córdoba, España.
- Pallett, R.N., Sale, G., 2004. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in *Eucalyptus* pulpwood stands. *For. Ecol. Manag.*, Synthesis of the physiological, environmental, genetic and silvicultural determinants of the growth and productivity of eucalypts in plantations. 193, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.021>
- Paparotti, O., Gvozdenovich, J., 2007. Caracterización de Zonas y Zubzonas Agroeconómicas Homogéneas de Entre Ríos., RIAP Entre Ríos RIAN-RIAP (Red de Información Agroeconómica para Ciclo). ed. Centro Regional Entre Ríos–INTA, Entre Ríos, Argentina.
- Pardos Carrión, J. A. (2007). Perspectiva fisiológica en la producción y mejora del eucalipto:(con énfasis en *Eucalyptus globulus* Labill).
- Paz-Ferreiro, J., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., Seoane, S., & Gil-Sotres, F. (2009). Biochemical properties in managed grassland soils in a temperate humid zone: modifications of soil quality as a consequence of intensive grassland use. *Biology and fertility of soils*, 45(7), 711-722.

- Penon, E., Costa, M., Barañao, J., Craig, E., Gaitan, J., Cucciuffo, E., Lopez, G., Traverso, J., 2004. Modelos de crecimiento de *Eucalyptus globulus* a partir de las propiedades del suelo. Presented at the Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Entre Ríos, Argentina, p. 10.
- Pereyra, F.X., Baumann, V., Altinier, V., Ferrer, J., Tchilinguirian, P., 2004. Génesis de suelos y evolución del paisaje en el delta del río Paraná. *Rev. Asoc. Geológica Argent.* 59, 229–242.
- Pita, P., Pardos, J.A., 2001. Growth, leaf morphology, water use and tissue water relations of *Eucalyptus globulus* clones in response to water deficit. *Tree Physiol.* 21, 599–607.
- Querejeta, J. I., Roldán, A., Albaladejo, J., & Castillo, V. (2001). Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *Forest Ecology and Management*, 149(1-3), 115-128.
- Rodríguez, G.P., Cerr, R.N., 2005. Efecto de la calidad de planta, el procedimiento de preparación y la fecha de plantación en la supervivencia de una repoblación de *Pinus pinea* L., in: *Congresos Forestales*.
- Rokich, D.P., Bell, D.T., 1995. Light Quality and Intensity Effects on the Germination of Species From the Jarrah (*Eucalyptus marginata*) Forest of Western Australia. *Aust. J. Bot.* 43, 169–179. <https://doi.org/10.1071/bt9950169>
- Rubilar, R.A., Fox, T.R., Albaugh, T.J., Carlson, C., 2008. Manejo intensivo al establecimiento de plantaciones forestales de *Pinus* sp. y *Eucalyptus* sp. en Chile y Argentina. *Inf. Agronómicas Cono Sur* 40, 1–6.
- Salamanca, A., Sadeghian, S., 2006. La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* 56, 381–397.

- Salcedo-Pérez, E., Galvis-Spinola, A., Hernández-Mendoza, T.M., Rodríguez-Macias, R., Zamora-Natera, F., Bugarin-Montoya, R., Carrillo-González, R., 2007. La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoam.* 25, 419–425.
- Sands, R., Mulligan, D.R., 1990. Water and nutrient dynamics and tree growth. *For. Ecol. Manag., Management of water and nutrient relations to increase forest growth* 30, 91–111. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(90\)90129-Y](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90129-Y)
- Sasse, J., Sands, R., 1996. Comparative responses of cuttings and seedlings of *Eucalyptus globulus* to water stress. *Tree Physiol.* 16, 287–294.
- Sch, A.E., 1999. Cambios estructurales y distribución de tensiones en suelos sujetos al tránsito de maquinaria. *Bosque* 20, 37–45. <https://doi.org/10.4206/bosque.1999.v20n1-04>
- Schönau, A.P.G., 1985. Basic silviculture for the establishment of eucalypt plantation with special reference to *eucalyptus grandis*. *South Afr. For. J.* 134, 4–9. <https://doi.org/10.1080/00382167.1985.9629587>
- Schönau, A.P.G., 1984. Silvicultural considerations for high productivity of *Eucalyptus grandis*. *For. Ecol. Manag.* 9, 295–314. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(84\)90015-X](https://doi.org/10.1016/0378-1127(84)90015-X)
- Schönau, A.P.G., Herbert, M.A., 1989. Fertilizing eucalypts at plantation establishment. *For. Ecol. Manag.* 29, 221–244. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(89\)90096-0](https://doi.org/10.1016/0378-1127(89)90096-0)
- Schönau, A.P.G., Verloren van Themaat, R., Boden, D.I., 1981. The importance of complete site preparation and fertilising in the establishment of *Eucalyptus grandis*. *South Afr. For. J.* 116, 1–10. <https://doi.org/10.1080/00382167.1981.9629997>
- Serrada Hierro, R., 2004. La preparación del suelo en la repoblación forestal - Buscar con Google, in: *Cursos. Universidad de Santiago de Compostela*, pp. 21–33.

- Silva, P.H.M. da, Poggiani, F., Libardi, P.L., Gonçalves, A.N., 2013. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. *For. Ecol. Manag.* 301, 67–78. <https://doi.org/0378-1127>
- Silveira, R. L. V. D. A. (2000). Efeito do potássio no crescimento, nas concentrações dos nutrientes e nas características da madeira juvenil de progênies de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden cultivadas em solução nutritiva (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Smith, C.W., Little, K.M., Norris, C.H., 2001. The effect of land preparation at re-establishment on the productivity of fast growing hardwoods in South Africa. *Aust. For.* 64, 165–174. <https://doi.org/10.1080/00049158.2001.10676182>
- Snedecor, G.W., Cochran, W.G., 1980. *Statistical methods*, 7th ed. Iowa University Press., Iowa, USA.
- Snowdon, P., 2002. Modeling Type 1 and Type 2 growth responses in plantations after application of fertilizer or other silvicultural treatments. *For. Ecol. Manag.* 163, 229–244. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00582-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00582-5)
- Soracco, C.G., Filgueira, R.R., Sarli, G.O., Fournier, L.L., Gelati, P.R., Hilbert, J., 2009. Persistencia del efecto del subsolado sobre el movimiento del agua en el suelo en siembra directa: Uso de dos modelos teóricos. *Cienc. Suelo* 27, 77–87.
- Spurr, S.H., Barnes, B.V., 1982. *Ecología forestal*, S.A. ed. AGT México.
- Stengel, P. (1979). Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. In *Annales agronomiques* (Vol. 30, No. 1, pp. 27-51).
- Stoneman, G.L., Crombie, D.S., Whitford, K., Hingston, F.J., Giles, R., Portlock, C.C., Galbraith, J.H., Dimmock, G.M., 1997. Growth and water relations of *Eucalyptus*

marginata (jarrah) stands in response to thinning and fertilization. *Tree Physiol.* 17, 267–274. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.4.267>

Tafur, M.S.M., Zapata, C.M.-, Urrego, J.B., Ibarra, D.M., Leal, J.J., 2017. Efecto del estrés hídrico sobre la acumulación y distribución de biomasa en *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Acta Agronómica* 66, 56–62. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n1.52628>

Tasi, H., 2009. Aplicación de las Cartas de Suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar Índices de Productividad Específicos para los principales cultivos Agrícolas. (Doctoral). Universidade Da Coruña, Entre Ríos, Argentina.

Tasi, H., Schulz, G., Bedendo, D., 2012. Índices de productividad específico para eucaliptos en tres departamentos de Entre Ríos, in: XXIII Congreso Argentino de la ciencia del suelo. Presented at the XIX Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo, Mar del Plata, Argentina, p. 6.

Tasi, H.A., 2000. Aptitud de uso y estado de degradación de los suelos vertisoles y vérticos de la provincia de Entre Ríos. *Rev. Fac. Agron.* 1–6.

Teare, I.D., Peet, M.M., 1983. *Crop-water relations*. Wiley NY., New York.

Tertulino Rocha, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Ferraz, A. de V., Poiati, D.A., Arthur Junior, J.C., Hubner, A., 2019. Growth dynamics and productivity of an *Eucalyptus grandis* plantation under omission of N, P, K Ca and Mg over two crop rotation. *For. Ecol. Manag.* 447, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.060>

Teixeira, P. C., Leal, P. G. L., De Barros, N. F., & De Novais, R. F. (1995). Nutrición potásica y relaciones hídricas en plantas de *Eucalyptus* spp. *Bosque*, 16(1), 61-68.

Tormena, C.A., da Silva, A.P., Libardi, P.L., 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Tillage Res.* 52, 223–232. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00086-0)

- Vallejo, A., Zapata, F., 2018. *Eucaliptus grandis* [WWW Document]. For. Maderero. URL <https://www.forestmaderero.com/articulos/item/eucalipto-grandis.html> (accessed 2.22.20).
- Vallejos, A., Kees, M., Bondia, P., Echeverría, N., Silenzi, J., Zajac, C., Lucia, M., 2014. Subsulado En Siembra Directa: Efectos Sobre Parámetros Físicos Del Suelo y El Rendimiento De Soja 32, 291–300.
- Varelides, C., Kritikos, T., 1995. Effect of site preparation intensity and fertilization on *Pinus pinaster* survival and height growth on three sites in northern Greece. For. Ecol. Manag. 73, 111–115. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03495-I](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03495-I)
- Vaz, C.M.P., Hopmans, J.W., 2001. Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer–TDR moisture probe. Soil Sci. Soc. Am. J. 65, 4–12.
- Villarreal, R., Lozano, L.A., Soracco, G., Sarli, G.O., 2015. Influencia del manejo sobre el movimiento del agua en el suelo en condiciones de flujo no saturado. Investig. Joven 2.
- Von-Wallis, A., 2013. Contenidos de materia orgánica y condición física de un Kandiuult de Misiones bajo diferentes sistemas de preparación dle terreno forestal y bosque nativo (Tesis de Maestría). Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil science, 37(1), 29-38.
- Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., Guo, S., 2013. The Critical Role of Potassium in Plant Stress Response. Int. J. Mol. Sci. 14, 7370–90. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>

Whitehead, D., Beadle, C.L., 2004. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. *For. Ecol. Manag.* 193, 113–140.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.026>

Wilson, M., Cerana, J., 2004. Mediciones físicas en suelos con características vérticas.

Wolf, B., Snyder, G., 2003. Sustainable soils: the place of organic matter in sustaining soils and their productivity. CRC Press, United States of America.

Zotarelli, L., Dukes, M.D., Morgan, K.T., 2019. Interpretación del Contenido de la Humedad del Suelo para Determinar Capacidad de Campo y Evitar Riego Excesivo en Suelos Arenosos Utilizando Sensores de Humedad. *IFAS Extension* 4.
<https://doi.org/doi.org/10.32473/edis-ae496-2013>

7. Apendices

Contenido de nutrientes en el Suelo

El contenido de cationes intercambiables (Mg, Ca, K, Na, Fe, Mn, Zn y Cu) del suelo arcilloso, fue determinado utilizando el método de absorción atómica. En la Tabla 7.1. se muestra el análisis del contenido de algunos nutrientes del suelo bajo estudio sobre la línea de plantación (LP) y en el entre surco (ES). En general se observaron pocas diferencias entre los tratamientos, el área de medición (LP o ES) y los estratos evaluados. En el caso del **Mg** no mostró diferencias significativas para ninguno de los tres factores evaluados. En el caso del elemento **Ca** la muestra de suelo del C+S tomada en el ES fue la que obtuvo los mayores contenidos. El **Fe**, **Zn** y el **Cu** mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el tratamiento de C el que obtuvo los mayores valores, seguido del tratamiento C+S y S.

El contenido de **K** evidenció diferencias significativas entre los tratamientos, presentando el tratamiento de S (17,48 (cmol/kg)), seguido del C (13,84 (cmol/kg)) y por último C+S (13,05 (cmol/kg)). EL **Na** mostró los mayores valores para las muestras tomadas en el estrato de 0-5cm sobre la LP. El contenido de **Mn** fue mayor en la LP.

Tabla 7.1. Evaluación del contenido de nutrientes del suelo , en las parcelas de los tratamientos de Camellón + Subsulado (C+S), Camellón (C) y Subsulado (S). Muestreo realizado por estratos (0-5cm; 5-10cm; 10-15cm; 15-20cm) en el entre surco (ES) y en la línea de plantación (LP). (valores entre paréntesis corresponden al error estándar; letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos). Mg: magnesio, Ca: calcio, K: potasio, Na: sodio, Fe: hierro, Mn: manganeso, Zn: zinc, Cu: cobre.

Muestra	Mg	Ca	K	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
(cmol/kg)								
C+S ES 0-5 cm	3.87a (1,08)	16.66a (5,36)	0.16ab (0,01)	0.14a (0,01)	0.17b (0,09)	0.47abc (0,12)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C+S ES 5-10 cm	3.35a (0,50)	25.64a (14,36)	0.14bc (0,00)	0.14a (0,02)	0.15b (0,08)	0.21c (0,03)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C+S ES 10-15 cm	2.81a (0,10)	18.41a (7,78)	0.13bc (0,02)	0.17a (0,02)	0.41ab (0,31)	0.22bc (0,08)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C+S ES 15-20 cm	2.82a (0,14)	27.95a (18,24)	0.12bc (0,01)	0.17a (0,02)	0.34ab (0,18)	0.22bc (0,11)	0.01a (0,00)	0.00a (0,00)
C ES 0-5 cm	3.01ab (0,37)	13.68abc (2,96)	0.19a (0,05)	0.11b (0,02)	0.20b (0,11)	0.23a (0,03)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C ES 5-10 cm	2.85ab (0,23)	12.75bc (2,23)	0.18a (0,04)	0.14ab (0,01)	0.30ab (0,17)	0.41a (0,15)	0.01a (0,00)	0.00a (0,00)
C ES 10-15 cm	2.84ab (0,29)	10.73c (1,20)	0.15a (0,02)	0.15ab (0,01)	0.27ab (0,15)	0.25a (0,03)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C ES 15-20 cm	3.65a (0,51)	10.97c (2,34)	0.13a (0,01)	0.18a (0,01)	0.52ab (0,19)	0.30a (0,03)	0.01a (0,01)	0.00a (0,00)
S ES 0-5 cm	3.27a (0,23)	15.28abc (1,69)	0.22a (0,02)	0.15ab (0,01)	0.11a (0,04)	0.77ab (0,15)	0.01a (0,00)	0.00a (0,00)
S ES 5-10 cm	3.37a (0,46)	16.82ab (2,67)	0.17bc (0,02)	0.13b (0,02)	0.18a (0,14)	0.36c (0,10)	0.01a (0,00)	0.00a (0,00)
S ES 10-15 cm	3.12a (0,16)	10.09c (0,65)	0.15c (0,01)	0.15b (0,01)	0.18a (0,06)	0.31c (0,05)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
S ES 15-20 cm	3.02a (0,21)	12.76abc (1,17)	0.15c (0,01)	0.16ab (0,02)	0.11a (0,03)	0.38c (0,05)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C+S LP 0-5 cm	3.33a (0,33)	16.19a (2,28)	0.19a (0,04)	0.17a (0,01)	0.37ab (0,22)	0.66a (0,23)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C+S LP 5-10 cm	3.06a (0,18)	12.56a (1,14)	0.15ab (0,02)	0.14a (0,01)	0.24b (0,10)	0.52ab (0,09)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C+S LP 10-15 cm	2.79a (0,11)	10.68a (0,55)	0.11c (0,01)	0.17a (0,02)	0.78a (0,26)	0.3bc (0,11)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C+S LP 15-20 cm	3.54a (0,35)	11.71a (1,14)	0.14abc (0,01)	0.17a (0,02)	0.54ab (0,25)	0.40abc (0,11)	0.00a (0,00)	0.00a (0,00)
C LP 0-5 cm	3.18ab	17.35ab	0.19a	0.18a	0.82a	0.44a	0.01a	0.00a

	(0,27)	(2,70)	(0,02)	(0,04)	(0,43)	(0,17)	(0,00)	(0,00)
C LP 5-10 cm	3.27ab	17.65a	0.18a	0.15ab	0.21ab	0.49a	0.01a	0.00a
	(0,45)	(2,80)	(0,02)	(0,01)	(0,08)	(0,19)	(0,00)	(0,00)
C LP 10-15 cm	2.94ab	12.07c	0.15a	0.15ab	0.37ab	0.23a	0.01a	0.00a
	(0,24)	(1,82)	(0,02)	(0,01)	(0,16)	(0,05)	(0,01)	(0,00)
C LP 15-20 cm	2.75b	9.17c	0.14a	0.15ab	0.62ab	0.24a	0.00a	0.00a
	(0,26)	(0,62)	(0,03)	(0,01)	(0,27)	(0,03)	(0,00)	(0,00)
S LP 0-5 cm	3.34a	18.62a	0.21ab	0.20a	0.19a	1.01a	0.01a	0.00a
	(0,47)	(4,96)	(0,02)	(0,02)	(0,04)	(0,33)	(0,00)	(0,00)
S LP 5-10 cm	2.88a	13.99abc	0.17c	0.14b	0.21a	0.56bc	0.00a	0.00a
	(0,22)	(0,67)	(0,01)	(0,01)	(0,07)	(0,08)	(0,00)	(0,00)
S LP 10-15 cm	3.03a	11.35bc	0.15c	0.16ab	0.21a	0.33c	0.00a	0.00a
	(0,08)	(1,08)	(0,01)	(0,01)	(0,04)	(0,05)	(0,00)	(0,00)
S LP 15-20 cm	2.97a	11.79bc	0.14c	0.16ab	0.13a	0.35c	0.00a	0.00a
	(0,30)	(0,59)	(0,01)	(0,01)	(0,02)	(0,06)	(0,00)	(0,00)

Tabla 7.2. Evaluación de los tratamientos sobre las propiedades hidro-físicas del suelo. (valores entre paréntesis corresponden al error estándar; letras distintas indican diferencias significativas entre los tratamientos).

Variable	Tratamientos		
	S	C	C+S
Sortividad (Sort)	2,24 (0,28) b	2,8 (0,43) ab	4,39 (0,82) a
EE (mm)	1,51 (0,06) b	1,72 (0,08) a	1,77 (0,05) a
T2 (mm)	1,17 (0,08) a	1,32 (0,09) a	1,32 (0,06) a
P_{agreg} (m³/m³)	0,34 (0,01) a	0,34 (0,01) a	0,35 (0,01) a
T3 (mm)	2,62 (0,13) a	2,68 (0,08) a	2,83 (0,06) a
T1 (mm)	0,78 (0,08) b	1,10 (0,15) a	1,14 (0,12) a
K_{sat} (cm/h)	15,75 (4,81) a	9,87 (2,67) a	7,12 (1,63) a
PT (%)	44,00 (1,75) a	41,34 (2,08) a	43,88 (2,28) a
Da (g/cm³)	1,35 (0,04) a	1,35 (0,04) a	1,33 (0,06) a
PMP (%)	14,22 (0,48) a	12,37 (0,54) b	13,39 (0,61) a
CC (%)	23,63 (0,61) a	22,23 (0,97) a	23,03 (0,85) a
MO 0-10 cm (%)	4,51 (0,87) a	3,79 (0,96) b	3,55 (0,88) b
MO 10-20 cm (%)	3,06 (0,78) a	1,94 (0,78) c	2,44 (0,77) b