

UNIVERSIDAD NACIONAL

SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN AGRICULTURA ECOLÓGICA

MANEJO DE PLANTAS ARVENSES CON COBERTURA VIVA DE KUDZÚ
(*PUERARIA PHASEOLOIDES* (ROXB. BENTH)) Y ÁREA ÓPTIMA DE CONTROL EN LA
SILVICULTURA CLONAL DE TECA (*TECTONA GRANDIS* L. F)

MÓNICA LIZBETH CORTÉS CORTÉS

DAVID ANTONIO CARVAJAL ARROYO

Heredia, 2025

Tesis sometida a consideración del Tribunal Examinador del Posgrado en Agricultura Ecológica de la Escuela de Ciencias Agrarias, para optar por el grado de *Magister Scientiae* en Agricultura Ecológica.

**MANEJO DE PLANTAS ARVENSES CON COBERTURA VIVA DE
KUDZÚ (*PUERARIA PHASEOLOIDES* (ROXB. BENTH)) Y ÁREA ÓPTIMA
DE CONTROL EN LA SILVICULTURA CLONAL DE TECA (*TECTONA
GRANDIS* L. F)**

MÓNICA LIZBETH CORTÉS CORTÉS

DAVID ANTONIO CARVAJAL ARROYO

Tesis presentada para optar al grado de *Magister Scientiae* en Agricultura Ecológica. Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

[Dr. Randall Gutiérrez Vargas /Dra. Damaris Castro García /Dr. Gerardo Jiménez Porras/ Dr. José Vega Baudrit /Dr. Greivin Rodríguez Calderón/ Dra. Rocío Castillo Cedeño]

Representante del Consejo Central de Posgrado

Dr. Gerardo Cerdas Vega

Coordinador Maestría en Agricultura Ecológica

Ph.D. Fernando Ramírez Muñoz

Tutor de tesis

M.Sc. Rafael Murillo Cruz

Miembro del Comité Asesor

M.Sc. Diana Mora Campos

Miembro del Comité Asesor

Lic. Mónica Lizbeth Cortés Cortés

Sustentante

Lic. David Antonio Carvajal Arroyo

Sustentante

Descriptores

Agroecología, arvenses, coberturas vivas, crecimiento dasométrico, cromatografía, herbicidas sintéticos, nematodos, silvicultura clonal, suelo.

Resumen

La búsqueda de alternativas sostenibles al uso intensivo de herbicidas sintéticos en plantaciones forestales comerciales, particularmente en los cultivos de *Tectona grandis*, los cuales representan la mayor área de reforestación en Costa Rica, es una necesidad actual para los silvicultores. El uso frecuente de estos agroquímicos ha generado impactos negativos en la salud del suelo, la biodiversidad, la calidad del agua y la salud humana, lo que pone en riesgo la sostenibilidad del sistema productivo. Ante este escenario, el presente estudio propone la evaluación de prácticas como el uso de coberturas vivas y la reducción del área de aplicación de herbicidas sintéticos, con el fin de mantener el manejo de arvenses sin comprometer el crecimiento de los árboles ni los recursos naturales.

Para ello, se evaluaron dos métodos alternativos al uso convencional de herbicidas sintéticos para el manejo de arvenses en plantaciones clonales de *T. grandis* en San Carlos y Los Chiles, Costa Rica: las coberturas vivas (*Pueraria phaseoloides*, *Vigna radiata* y *Crotalaria juncea*) y la reducción del área de aplicación de herbicidas. Se compararon los costos de insumos y mano de obra entre distintos tratamientos de reducción de área aplicada con herbicidas y el manejo tradicional, y se analizó su efecto sobre el crecimiento de los árboles y la salud del suelo, especialmente en los grupos tróficos de nematodos. Asimismo, se valoraron los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo después de tres años de establecidas las coberturas vivas, y se evaluaron diferentes densidades de siembra de *P. phaseoloides* para identificar aquella que permita un manejo eficiente de las arvenses sin afectar el desarrollo de los árboles. Esta investigación busca generar información útil para la implementación de prácticas silviculturales más sostenibles y compatibles con los principios de la Agroecología.

Los experimentos fueron establecidos en el distrito de Pocosol del cantón de San Carlos y San Jorge del cantón de Los Chiles, Alajuela, Costa Rica entre el 2021 y el 2024, realizando un seguimiento del crecimiento de los árboles, de los porcentajes de cobertura del suelo, tanto por las coberturas

sembradas como por las arvenses, de los cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo, cromatografía de suelos, población de nematodos y los costos asociados. Cabe destacar que, al momento de la evaluación final, en el ensayo para la determinación de cambios en propiedades fisicoquímicas del suelo, *P. phaseoloides* fue la única especie que se mantuvo presente a diferencia de *C. juncea* y *V. radiata* que se mantuvieron solo durante el primer año.

Los resultados señalan que bajo las condiciones edafoclimáticas y de manejo silvicultural del experimento en Banderas, se demostró que la aplicación de herbicidas en franjas de 1,2 m, dejando un 70 % de cobertura vegetal, permite un adecuado crecimiento dasométrico de los árboles, además de reducir los costos en mano de obra, herbicidas aplicados y del impacto sobre el suelo en comparación con la aplicación total. Asimismo, en San Cristóbal el uso de franjas de 2,4 m mostró, a los tres años, un crecimiento de *T. grandis* comparable al tratamiento de aplicación de herbicida en el total del área, permitiendo una cobertura de arvenses del 40 %, lo que sugiere que es posible mantener una buena productividad con una menor intervención química.

En cuanto a los grupos tróficos de nematodos (fitoparásitos, bacteriófagos, depredadores y micófagos), no se observaron cambios significativos en su población quince días después de la aplicación de herbicidas, por lo que se recomienda un seguimiento a largo plazo para evaluar posibles efectos acumulativos. Por otro lado, el manejo manual de arvenses presentó mayores costos en comparación con el uso de herbicidas sintéticos, aunque resulta necesario en situaciones donde la altura de la vegetación impide la aplicación química. En general, los costos aumentan con el incremento del área tratada con herbicidas, mientras que el manejo manual se encarece cuando se reduce el uso de control químico.

El uso de coberturas vivas de *V. radiata* en combinación con *C. juncea* demostró ser una estrategia eficaz para mejorar las características fisicoquímicas del suelo, aumentando el porcentaje de materia orgánica,

carbono, concentración de Ca, y disminuyendo significativamente su acidez. Por otro lado, se evidenció que *P. phaseoloides* al mantenerse en el tiempo propició aumentos en los contenidos de N del suelo, disminuyó la resistencia a la penetrabilidad y aumentó la saturación de Ca, promoviendo valores óptimos para el desarrollo de *T. grandis*. Los cromatogramas muestran una integración armónica de la materia orgánica, la zona enzimática y los minerales, reflejando una microbiología activa y una buena disponibilidad de nutrientes. A pesar de las variaciones en la coloración y los diámetros de las zonas, las diferencias entre tratamientos no fueron significativas, aunque evidencian la influencia positiva de las coberturas vivas en la dinámica del suelo.

Los resultados también señalan que la densidad óptima de siembra de *P. phaseoloides* es de 0,125 kg/ha, ya que el tratamiento con una hilera de *P. phaseoloides* presentó una cobertura total similar a la de densidades más altas (0,625 kg/ha) y similar al del uso de herbicida (testigo), lo que evidencia su potencial como herramienta agroecológica para la reducción del uso de herbicidas químicos. A pesar del buen desempeño del *P. phaseoloides* como cobertura, se observó una tendencia a trepar los árboles, especialmente en densidades altas, como es el uso de cinco hileras de *P. phaseoloides*, donde más del 50 % de los árboles se vieron completamente cubiertos a los 6 meses (180 dds).

Si bien no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la altura de los árboles entre tratamientos a los 180 días, una afectación elevada por *P. phaseoloides* podría comprometer el crecimiento a largo plazo. Por tanto, una densidad moderada de siembra, como la utilizada con una hilera de *P. phaseoloides*, permite mantener un adecuado equilibrio entre el manejo de arvenses, crecimiento del arbolado y reducción de la afectación por trepamiento. Es importante mencionar que los beneficios anteriores se obtienen a base de brindar mantenimiento adecuado a *P. phaseoloides*, ya que, por ser una planta trepadora y perenne, puede afectar el desarrollo de los árboles y la calidad de la madera.

En conclusión, los resultados de este estudio evidencian que es posible adoptar estrategias agroecológicas sostenibles para el manejo de arvenses en plantaciones comerciales de *T. grandis* sin comprometer el crecimiento de los árboles ni la salud del suelo. La aplicación de herbicidas en franjas estrechas y el uso de coberturas vivas, especialmente *P. phaseoloides* a densidades moderadas, ofrecen alternativas viables al manejo convencional, al reducir costos, disminuir el impacto ambiental y mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo. No obstante, para asegurar su efectividad y minimizar riesgos como el trepamiento excesivo sobre los árboles, es fundamental establecer densidades de siembra adecuadas y brindar un mantenimiento oportuno. De este modo, se promueve un sistema silvicultural más resiliente y en armonía con los principios de la agroecología, contribuyendo a la sostenibilidad de la reforestación comercial en Costa Rica.

Abstract

The search for sustainable alternatives to the intensive use of synthetic herbicides in commercial forest plantations, particularly in *Tectona grandis* crops, which represent the largest area of reforestation in Costa Rica, is a current necessity for foresters. The frequent use of these agrochemicals has had negative impacts on soil health, biodiversity, water quality, and human health, jeopardizing the sustainability of the production system. Given this scenario, this study proposes the evaluation of practices such as the use of living covers and the reduction of the area of application of synthetic herbicides, in order to maintain weed management without compromising tree growth or natural resources.

To this end, two alternative methods to the conventional use of synthetic herbicides for weed management in clonal plantations of *T. grandis* in San Carlos and Los Chiles, Costa Rica, were evaluated: cover crops (*Pueraria phaseoloides*, *Vigna radiata*, and *Crotalaria juncea*) and reducing the area of herbicide application. Input and labor costs were compared between different treatments to reduce the area treated with herbicides and traditional management, and their effect on tree growth and soil health was analyzed, especially in nematode trophic groups. Changes in the physicochemical properties of the soil were also assessed three years after the establishment of the living covers, and different planting densities of *P. phaseoloides* were evaluated to identify the one that allows for efficient weed management without affecting tree development. This research seeks to generate useful information for the implementation of more sustainable silvicultural practices that are compatible with the principles of agroecology.

The experiments were established in the Pocosol district of the San Carlos canton and San Jorge district of the Los Chiles canton, Alajuela, Costa Rica, between 2021 and 2024, monitoring tree growth, soil cover percentages (both planted cover and weeds), changes in soil physicochemical properties, soil chromatography, nematode populations, and associated costs. It should be noted that, at the time of

the final evaluation, in the trial to determine changes in the physicochemical properties of the soil, *P. phaseoloides* was the only species that remained present, unlike *C. juncea* and *V. radiata*, which remained only during the first year.

The results indicate that under the soil and climate conditions and silvicultural management of the experiment in Banderas, it was demonstrated that the application of herbicides in 1.2 m strips, leaving 70 % of the vegetation cover, allows for adequate dasometric growth of the trees, in addition to reducing labor costs, herbicide application, and impact on the soil compared to total application. Similarly, in San Cristóbal, the use of 2.4 m strips showed, after three years, growth of *T. grandis* comparable to the treatment of herbicide application over the entire area, allowing 40 % weed coverage, which suggests that it is possible to maintain good productivity with less chemical intervention.

As for the trophic groups of nematodes (phytoparasites, bacteriophages, predators, and mycophages), no significant changes in their population were observed fifteen days after herbicide application, so long-term monitoring is recommended to assess possible cumulative effects. On the other hand, manual weed management was more costly than the use of synthetic herbicides, although it is necessary in situations where the height of the vegetation prevents chemical application. In general, costs increase with the increase in the area treated with herbicides, while manual management becomes more expensive when the use of chemical control is reduced.

The use of live cover crops of *V. radiata* in combination with *C. juncea* proved to be an effective strategy for improving the physicochemical characteristics of the soil, increasing the percentage of organic matter, carbon, and Ca concentration, and significantly decreasing its acidity. On the other hand, it was evident that *P. phaseoloides*, when maintained over time, led to increases in soil N content, decreased resistance to penetrability, and increased Ca saturation, promoting optimal values for the development

of *T. grandis*. The chromatograms show a harmonious integration of organic matter, the enzymatic zone, and minerals, reflecting active microbiology and good nutrient availability. Despite variations in coloration and zone diameters, the differences between treatments were not significant, although they show the positive influence of living cover crops on soil dynamics.

The results also indicate that the optimal sowing density for *P. phaseoloides* is 0.125 kg/ha, since the treatment with one row of *P. phaseoloides* presented a total coverage similar to that of higher densities (0.625 kg/ha) and similar to that of herbicide use (control), which demonstrates its potential as an agroecological tool for reducing the use of chemical herbicides. Despite the good performance of *P. phaseoloides* as a cover crop, a tendency to climb trees was observed, especially at high densities, such as the use of five rows of *P. phaseoloides*, where more than 50 % of the trees were completely covered after 6 months (180 days).

Although no statistically significant differences in tree height were found between treatments at 180 days, high infestation by *P. phaseoloides* could compromise long-term growth. Therefore, moderate planting density, such as that used with one row of *P. phaseoloides*, allows for an adequate balance between weed management, tree growth, and reduction of climbing impact. It is important to mention that the above benefits are obtained by providing adequate maintenance to *P. phaseoloides*, since, being a climbing and perennial plant, it can affect tree development and wood quality.

In conclusion, the results of this study show that it is possible to adopt sustainable agroecological strategies for weed management in commercial *T. grandis* plantations without compromising tree growth or soil health. The application of herbicides in narrow strips and the use of living covers, especially *P. phaseoloides* at moderate densities, offer viable alternatives to conventional management by reducing costs, decreasing environmental impact, and improving the physicochemical properties of the soil. However, to ensure effectiveness and minimize risks such as excessive climbing on trees, it is

essential to establish appropriate planting densities and provide timely maintenance. This promotes a more resilient silvicultural system in harmony with the principles of agroecology, contributing to the sustainability of commercial reforestation in Costa Rica.

Agradecimientos

Agradecemos a las empresas que facilitaron el acceso a sus fincas para el establecimiento y evaluación de los ensayos con coberturas vivas y área óptima de control, cuya colaboración fue fundamental para la realización del presente estudio.

Agradecemos a la Vicerrectoría de Investigación por el apoyo económico brindado para la ejecución de los trabajos finales de graduación y al proyecto MESIAGRO del INISEFOR que brindaron su apoyo para la realización de giras y montaje de ensayos. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento a la Iniciativa Logos y Cosmos (ILC) y a International Fellowship of Evangelical Students (IFES) quienes apoyaron la investigación.

Agradecemos al comité asesor de esta tesis y a Martha Orozco Aceves por sus valiosos comentarios, observaciones y sugerencias, los cuales contribuyeron de manera significativa a mejorar la calidad, el enfoque y el alcance del presente manuscrito. Su criterio académico, disposición para el diálogo y compromiso con la excelencia formativa enriquecieron este proceso y nos permitieron fortalecer el contenido técnico y nuestra propia capacidad crítica.

Brindamos un agradecimiento muy especial a Rafael Murillo Cruz, por su apoyo constante e incondicional en todas las áreas de nuestra vida. Su presencia cercana a lo largo de estos años —desde el bachillerato, pasando por la formación de grado, hasta culminar esta etapa de posgrado— ha sido significativa para nosotros. Gracias por animarnos, por guiarnos y por mostrarse siempre como un verdadero amigo, compañero y facilitador del conocimiento. Su disposición para compartir saberes, escuchar con atención y tender la mano cuando más lo necesitábamos ha dejado una huella imborrable en nuestro proceso formativo y personal. Esta tesis también lleva parte de su valioso acompañamiento, y por ello le estaremos siempre agradecidos.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nosotros mismos, Mónica y David, por la valentía de soñar y la determinación de convertir esos sueños en realidad mientras disfrutábamos del proceso. Esta tesis representa no solo el cierre de una etapa académica, sino también el reflejo de nuestro crecimiento personal y profesional. Que los conocimientos adquiridos se conviertan en herramientas útiles que podamos compartir con generosidad, contribuyendo a mejorar los sistemas productivos de quienes confían en nuestra labor. Nos dedicamos este logro con orgullo, reconociendo el valor de creer en nosotros mismos y en la transformación que nace del aprendizaje.

A nuestras madres, Luisa Cortés Cortés y Olga Martha Arroyo Pérez, y al padre de David, Julio Antonio Carvajal Peralta, quienes han sostenido nuestros sueños con la misma fuerza, fe y esperanza con que nosotros los hemos construido. Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos y por creer en nuestras capacidades. Este logro es también suyo: porque cada página escrita, cada aprendizaje alcanzado y cada obstáculo superado tiene sus raíces en los valores, el esfuerzo y la constancia que nos enseñaron con el ejemplo. A ustedes, que han sido guía, refugio y motor, les dedicamos esta tesis con profunda gratitud, amor y admiración.

A la memoria del Ingeniero Forestal Johnny Rodríguez Chacón, quien no solo fue un excelente profesional, sino también un mentor invaluable en nuestro proceso formativo. Su orientación, paciencia y profundo conocimiento marcaron una huella significativa. Johnny no solo nos ofreció su guía académica, sino también su apoyo humano, siempre dispuesto a compartir sus enseñanzas con generosidad y compromiso. Su inesperado fallecimiento dejó un vacío profundo en nuestros corazones, pero su legado perdura en cada paso que demos como profesionales. Esta tesis es también un homenaje a su vida, su pasión por el bosque y su entrega a la formación de nuevas generaciones.

Índice general

Descriptores.....	ii
Resumen	iii
Abstract.....	vii
Agradecimientos	xi
Dedicatoria.....	xii
Índice general.....	xiii
Lista de tablas	xvii
Lista de figuras	xviii
Lista de anexos.....	xix
Abreviaturas.....	xx
Capítulo I. Introducción	1
Objetivos de la investigación	7
<i>Objetivo general</i>	7
<i>Objetivos específicos</i>	7
Capítulo II. Marco teórico	8
Importancia de <i>Tectona grandis</i> L. f.	8
Silvicultura clonal	9
Manejo de plantas arvenses en plantaciones forestales.....	10
Área óptima de control.....	11
Herbicidas sintéticos	12
Efectos del glifosato en la salud del suelo	12
Agricultura ecológica	13
Coberturas vivas.....	14
Características de <i>Pueraria phaseoloides</i> (Kudzu) y su efecto en el suelo	15

Capitulo III. Efecto del área mínima de control de arvenses sobre el desarrollo de árboles, los costos de aplicación y la población de nematodos en plantaciones clonales de <i>Tectona grandis</i> L. f.	17
Resumen	17
Abstract.....	18
Introducción.....	19
Metodología.....	21
Área de estudio	21
Diseño experimental y tratamientos.....	21
Aplicación de los tratamientos.....	23
Variables evaluadas	23
Análisis de datos	25
Resultados y discusión	25
Efecto del área de aplicación de herbicidas sobre el desarrollo de los árboles	25
Costo de aplicación de herbicida según área de control.....	29
Variables dasométricas asociadas a costos de control de arvenses	32
Efecto en la población de grupos tróficos de nematodos	34
Conclusiones	39
Referencias.....	40
Capitulo IV. Efecto de tres coberturas vivas (<i>Pueraria phaseoloides</i> , <i>Vigna radiata</i> y <i>Crotalaria juncea</i>) en la interfase planta-suelo de una plantación clonal de <i>Tectona grandis</i> L.f.	51
Resumen	51
Abstract.....	52

Introducción.....	53
Metodología.....	54
<i>Área de estudio</i>	54
<i>Establecimiento del ensayo y diseño experimental</i>	55
<i>Variables de respuesta</i>	56
<i>Procesamiento de la información</i>	58
<i>Análisis estadístico</i>	58
Resultados y discusión	58
<i>Supresión de arvenses</i>	58
<i>Características químicas del suelo</i>	61
<i>Características físicas del suelo</i>	66
<i>Cromatografía de suelos</i>	67
<i>Crecimiento dasométrico</i>	71
Conclusiones	73
Referencias.....	74
Capítulo V. Evaluación de cuatro densidades de siembra de <i>Pueraria phaseoloides</i> (Roxb.) en una plantación forestal clonal de <i>Tectona grandis</i> L.f. para el manejo de arvenses.....	81
Resumen	81
Abstract.....	82
Introducción.....	83
Metodología.....	84

<i>Establecimiento de parcela experimental</i>	84
<i>Determinación de efectos de P. phaseoloides sobre el cultivo de T. grandis y las arvenses.</i> ..	87
<i>Análisis estadístico</i>	89
Resultados y discusión	89
<i>Manejo de arvenses</i>	89
<i>Efectos sobre el crecimiento de los árboles</i>	93
Conclusiones y recomendaciones.....	97
Referencias.....	98
Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones generales.....	102
Conclusiones	102
Recomendaciones.....	104
Capítulo VII. Referencias	105
Anexos.....	121

Lista de tablas

Tabla 1. Características de los tratamientos a evaluar y área de aplicación de herbicida sintético en los experimentos de área óptima de control.....	22
Tabla 2. Herbicidas y dosis de i.a utilizadas por hectárea en las fincas de San Cristóbal y Banderas, San Carlos, Costa Rica.	23
Tabla 3. Caracterización dasométrica de las plantaciones clonales de <i>T. grandis</i> de 3 años de edad, según área de aplicación de herbicidas, Costa Rica.....	26
Tabla 4. Costos por hectárea asociados al tiempo de aplicación de herbicidas sintéticos según área de control de arvenses en dos fincas productoras de <i>T. grandis</i> en la Zona Norte de Costa Rica.....	30
Tabla 5. Costos por hectárea asociados a la cantidad de herbicida sintético aplicado según área de control de arvenses en dos fincas productoras de <i>T. grandis</i> en la Zona Norte de Costa Rica.	31
Tabla 6. Costos por hectárea asociados al tiempo de manejo manual realizado según área de control de arvenses en la finca San Cristóbal, Costa Rica.....	32
Tabla 7. Costos totales (US\$) por hectárea asociados al manejo de arvenses en dos fincas productoras de <i>T. grandis</i> de tres años de edad en la Zona Norte de Costa Rica en.	34
Tabla 8. Diferencia en el número de individuos de grupos tróficos de nematodos (en 100 g suelo a capacidad de campo) presentes previa y posteriormente a la aplicación de herbicidas sintéticos según tratamientos de área de aplicación.	37
Tabla 9. Tratamientos y cantidad de semillas plantadas de cada una de las coberturas vivas.....	55
Tabla 10. Efectos de las coberturas vivas en la concentración de acidez, Ca, Mg, K y la capacidad de intercambio catiónico, Pocosol, 2024.	64
Tabla 11. Diferencia absoluta (mg/l) y relativa (%) en la concentración de P, Zn, Fe, Cu y Mn entre el año uno y el año tres en una plantación clonal de <i>T. grandis</i> , con diversos tratamientos de coberturas vivas Pocosol, 2024.....	66
Tabla 12. Características físicas de suelo sembrado con coberturas vivas en una plantación de clonal de tres años de <i>T. grandis</i> , Pocosol, 2024.	67
Tabla 13. Características dasométricas de árboles de <i>T. grandis</i> de tres años en parcelas experimentales sembradas con coberturas vivas, Pocosol, 2024.	72
Tabla 14. Descripción de los tratamientos y cantidad de semilla sembrada.	85
Tabla 15. Crecimiento en altura (m) y mortalidad de <i>T. grandis</i> según tratamiento en experimento de densidad de siembra de <i>P. phaseoloides</i> , Pocosol, 2024.....	95

Lista de figuras

Figura 1. Promedio de individuos presentes previo y posterior a la aplicación de herbicidas sintéticos según tratamiento y grupo trófico de nematodos evaluado en el ensayo de Banderas (A) y San Cristóbal (B), Costa Rica.	38
Figura 2. Porcentaje de cobertura de suelo de una plantación de <i>T. grandis</i> , tres años después de establecidos los cultivos de cobertura, Pocosol, 2024.	60
Figura 3. Efectos de las coberturas vivas sobre el porcentaje de (a) N, (b) C, (c) MO y (d) pH del suelo, Pocosol, 2024.	62
Figura 4. Cromatogramas del ensayo de coberturas vivas en plantaciones forestales, Pocosol, 2024.	69
Figura 5. Mediciones del radio promedio por zona de los cromatogramas según tratamiento de cobertura viva, a los 3 años Pocosol, 2024.	71
Figura 6. Descripción gráfica de los tratamientos de densidad de semillas de <i>P. phaseoloides</i> en Pocosol, 2024.	86
Figura 7. Distribución de los tratamientos en el sitio experimental. Fotografía aérea a los 180 días después de la siembra.	87
Figura 8. Porcentaje de cobertura de <i>P. phaseoloides</i> , arvenses de hoja ancha y de hoja angosta, según tratamiento. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).	91
Figura 9. Nivel de afectación de <i>P. phaseoloides</i> sobre los árboles clonales de <i>T. grandis</i> , en Pocosol, 2024.	96

Lista de anexos

Anexo 1. Suma de nematodos en 400 g de suelo a capacidad de campo por grupo trófico y genero previo y posterior a una aplicación de herbicidas sintéticos según área de control, asociados a plantaciones forestales de <i>T. grandis</i> en la finca Banderas, San Carlos de Costa Rica.....	121
Anexo 2. Suma de nematodos 400 g de suelo a capacidad de campo por grupo trófico y genero previo y posterior a una aplicación de herbicidas sintéticos según área de control, asociados a plantaciones forestales de <i>T. grandis</i> en la finca San Cristóbal, San Carlos de Costa Rica.....	122
Anexo 3. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento T1C (<i>Crotalaria juncea</i>) bloque I, II, III y IV.	123
Anexo 4. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento T2P (<i>Pueraria phaseoloides</i>) bloque I, II, III y IV.....	124
Anexo 5. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento T3V (<i>Vigna radiata</i>) bloque I, II, III y IV.	125
Anexo 6. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento T4P+C (<i>Crotalaria juncea</i> + <i>Pueraria phaseoloides</i>) bloque I, II, III y IV.	126
Anexo 7. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento TV5VP+C (<i>Crotalaria juncea</i> + <i>Vigna radiata</i>) bloque I, II, III y IV.	127
Anexo 8. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento Testigo absoluto bloque I, II, III y IV.....	128
Anexo 9. Fotografía área del ensayo de densidad de <i>P. phaseoloides</i> a los seis meses de edad.	129

Abreviaturas

<i>T. grandis</i>	<i>Tectona grandis</i>
<i>P. phaseoloides</i>	<i>Pueraria phaseoloides</i>
<i>V. radiata</i>	<i>Vigna radiata</i>
<i>C. juncea</i>	<i>Crotalaria juncea</i>
DAP	Diámetro a la altura del pecho
dds	Días después de la siembra
MO	Materia orgánica
pH	Potencial de hidrógeno (acidez del suelo)
CICE	Capacidad de intercambio catiónico efectiva
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
INTA	Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria
UNA	Universidad Nacional (Costa Rica)
ANDEVA	Análisis de varianza
Kg/ha	Kilogramos por hectárea
m ² /ha	Metro cuadrado / hectárea
L	Litros
i.a.	Ingrediente activo
USD / ₡	Dólares estadounidenses / colones costarricenses
P	Fósforo
Ca	Calcio
Mg	Magnesio
K	Potasio
Zn	Zinc
Mn	Manganeso
Fe	Hierro
Cu	Cobre
N	Nitrógeno
C	Carbono

Capítulo I. Introducción

A nivel global, las plantaciones forestales comerciales representan un 3 % del área total de la superficie, lo que equivale a 131 millones de ha; en Costa Rica esta cifra es cercana al 2 % (96 967 ha) del total de su territorio (Meza-Picado *et al.* 2019; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2020). El 44 % de las especies plantadas a nivel mundial son introducidas o exóticas, siendo *Tectona grandis* L.f (teca) y *Gmelina arborea* Roxb. (melina) dos de las más utilizadas en proyectos de reforestación comercial en el trópico (FAO, 2020). En Costa Rica, estas dos especies son las de mayor proporción e importancia económica, con un área cultivada de teca y melina para el 2024 de 50 066 y 14 455 ha, respectivamente, siendo la Región Huetar Norte y Chorotega donde se da la mayor reforestación con estas dos especies (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2024; Meza-Picado, 2019).

Durante varios años, en Costa Rica se han realizado diversos estudios para la selección de genotipos de *T. grandis* con características superiores en crecimiento, que permitan un mayor volumen de madera aprovechable en menos tiempo (Badilla y Murillo, 2022; Barrantes *et al.*, 2021; Fallas-Zúñiga, 2017). En el manejo silvicultural de las plantaciones forestales, se incluye el manejo de plantas arvenses durante el establecimiento y mantenimiento (Da Ponte y Salas, 2013; Gómez y Reiche, 1998; Martínez, 2015), con el fin de no interferir con el desarrollo de los árboles, sobre todo durante los tres primeros años, mientras se cierra la copa del cultivo.

A nivel nacional, las técnicas manuales, mecánicas, químicas y mixtas han sido las mayormente utilizadas para el manejo de arvenses en los sistemas de producción forestal (Zevallos-Vera, 2017). De ellas, la aplicación de herbicidas sintéticos preemergentes y postemergentes son muy utilizadas por su facilidad y efectividad, debido al efecto prolongado de control, la eficiencia y el rápido tiempo de acción (Guevara, 2011). En Costa Rica, se reportó un promedio de uso de herbicidas sintéticos en cultivos y

plantaciones forestales de 3,28 millones de kg de ingrediente activo (i.a.)/ha/año para el periodo 2012-2020 (Vargas-Castro, 2022). Los herbicidas químicos de mayor uso en cultivos agrícolas y forestales han sido el glifosato (grupo ácido fosforoso), paraquat (bipiridilo), 2,4-D (hormonal) y diuron (urea) (Alvarado-Prado *et al.*, 2022).

Sin embargo, la utilización de herbicidas en los sistemas productivos genera impactos negativos sobre el ambiente cambiando las características biológicas y físicas del suelo (Alvarado-Prado *et al.*, 2022; Avellaneda, 2022; Guzmán-Plazola *et al.*, 2016), contaminación del agua y aire (Pozo-Lira *et al.*, 2016), en la biodiversidad de los ecosistemas terrestres (Moná-Nieto *et al.*, 2021) y sobre la salud del ser humano (Alvarado-Prado *et al.*, 2022; Guzmán-Plazola *et al.*, 2016; López-Rojas, 2019), generando efectos agudos y crónicos de manera importante en trabajadores agrícolas debido a la exposición, pero también en las comunidades aledañas a las plantaciones.

Además de la contaminación ambiental y los efectos en la salud humana, el uso intensivo de herbicidas sintéticos se ha caracterizado por eliminar la cobertura vegetal, la cual brinda protección al suelo ante la radiación solar, así como protección contra la erosión hídrica y eólica (López *et al.*, 2018; Orozco-Bundis, 2006). La remoción mecánica o eliminación química de plantas arvenses ocasiona cambios en el suelo tales como la disminución en la penetrabilidad del agua, pérdida de complejidad estructural, cambio en la densidad aparente, aumento en la temperatura, reducción de la capacidad de intercambio catiónico (CICE) y cambios en el pH (Canales y Carrillo, 2018; Capurro y Montico, 2020; Fuentes-Molina *et al.*, 2023). Aunado a ello, se afecta la disponibilidad de nutrientes (N, P, K, entre otros) requeridos (García-Gutiérrez y Rodríguez-Meza, 2012).

Todo lo anterior puede repercutir negativamente en el crecimiento y desarrollo de especies forestales, afectando la producción silvícola. Por otro lado, se han informado efectos indeseados de los herbicidas sintéticos sobre la biología del suelo, afectando los microorganismos fundamentales para

mantener e incrementar la fertilidad (Crespo-Álvarez, 2020) y sobre la salud del sistema edáfico en general.

Por tal motivo, ante el alto uso de herbicidas químicos, es necesario buscar alternativas sostenibles para el manejo de plantas arvenses que permitan mantener una óptima producción de madera con un bajo impacto ecosistémico. En ese sentido, la agricultura ecológica es una herramienta que proporciona beneficios tanto ambientales como económicos (Hernández-Rodríguez, 2017; Rosales-Mora, 2020).

En la actualidad, la Agroecología promueve el fortalecimiento y la optimización de las relaciones entre plantas, animales, seres humanos y su entorno, incorporando además los componentes sociales necesarios para alcanzar un sistema alimentario equitativo y sostenible (FAO, 2018). Esta visión se refleja en los sistemas productivos mediante acciones orientadas a conservar y mejorar la fertilidad del suelo, resguardar los recursos naturales y evitar la contaminación ambiental (Pérez-Calderón, 2004). Para concretar los principios agroecológicos, resulta indispensable adoptar metodologías innovadoras que favorezcan la conservación e incluso el incremento de la calidad del suelo en las plantaciones forestales. En este sentido, se requiere generar y sistematizar información científica sobre prácticas alternativas que evidencien la posibilidad de disminuir, reemplazar o eliminar el uso de herbicidas sintéticos dentro de los sistemas de producción.

En el manejo de las plantaciones forestales comerciales algunas alternativas para el manejo de arvenses son el uso de coberturas vivas, la aplicación de herbicidas orgánicos, la aplicación de concentraciones reducidas de herbicidas sintéticos y la reducción del área aplicada (Garau *et al.*, 2009; Harper *et al.*, 2005; Hernández-Rodríguez, 2017). Las alternativas mencionadas, además de promover un manejo más eficiente de arvenses, tienen potencial para recuperar la fertilidad natural del suelo, evitar daños en la salud de las personas y del ambiente. Los beneficios de estas prácticas están asociados

directamente con la conservación del agua y del suelo, el aumento de la biodiversidad, la creación de hábitat para la fauna, la adaptación al cambio climático, e indirectamente con la promoción de la soberanía alimentaria y la reducción de la pobreza (Vázquez *et al.*, 2021).

A nivel mundial, existe poca información sobre la aplicación de métodos alternativos al uso de herbicidas sintéticos para el manejo de arvenses en plantaciones forestales. Dos prácticas con potencial son la siembra de especies que sirvan como coberturas vegetales y la reducción en diferentes proporciones del área aplicada del herbicida alrededor del árbol. Por ejemplo, Herrera-Mejía (2024), redujo el área de aplicación en un 40, 70 y 92 % en plantaciones de *T. grandis* obteniendo resultados en crecimiento aceptable de los árboles y un manejo de arvenses; no obstante, la evaluación se realizó en los primeros 12 meses de crecimiento, desconociendo el comportamiento de los árboles a mediano y largo plazo. En otros estudios con *T. grandis*, eucalipto y pino, el mejor rendimiento siempre se obtuvo con la aplicación total del área cultivada (Adams, 2003; Kogan y Figueroa, 1999).

Por otro lado, existe basta información sobre el uso de coberturas vivas de las especies *Vigna radiata*, *Pueraria phaseoloides*, *Cajanus cajan*, *Mucuna pruriens*, *Crotalaria spectabilis*, *Desmodium heterocarpon*, *Canavalia ensiformis* como método para manejar las arvenses en sistemas agrícolas de cultivos perennes como café, cacao y palma aceitera (García-Jiménez, 2019; Gómez-Gómez y González-Lutz, 2018; Haro-Mora y Vizcaino-Yepez, 2021; Pozo-Lira *et al.* 2016; Tirape-Hidalgo, 2022). Sin embargo, el uso de coberturas vivas en plantaciones forestales con dicho fin ha sido menos estudiado, pese a la existencia de investigaciones que evidencian resultados positivos de esta alternativa ecológica para el manejo de arvenses (Hernández-Rodríguez, 2017; Hernández-Rodríguez *et al.*, 2018; Rosales-Mora, 2020).

Entre las coberturas más utilizadas en cultivos como palma aceitera (Barrios-Maestre *et al.*, 2011; Fuentes-Molina *et al.*, 2023) se ha identificado al kudzú (*P. phaseoloides*) como una especie con

potencial para utilizarse en plantaciones forestales, ya que el porcentaje de cobertura es de hasta 70 % a los 90 días después de la siembra (dds), según lo reportado en Perú, y de 87 % a los 180 días en Colombia. Además, presenta una alta producción de biomasa seca (331 g/m^2), fija nutrientes atmosféricos al suelo, entre otros beneficios. Esta cobertura presenta un crecimiento inicial relativamente lento, pero luego de establecerse se comporta de manera agresiva debido a su hábito trepador. Esta última característica es importante, ya que para su uso es necesario determinar la densidad de siembra adecuada y frecuencia de manejo (chapia) para que no afecte (trepe) a las especies forestales.

Los estudios en Costa Rica sobre el efecto de alternativas para el manejo de arvenses en plantaciones forestales son pocos. Sin embargo, existen investigaciones sobre el uso de coberturas vivas que demuestran efectos positivos e importantes en el suelo como el aumento de la materia orgánica (MO), el N, el K y el carbono orgánico del suelo en plantaciones de *T. grandis* (Hernández-Rodríguez, 2017). Por otra parte, la mayoría de las investigaciones relacionadas con el uso de coberturas vivas se han realizado en cultivos agrícolas perennes (García-Jiménez, 2019; Pozo-Lira *et al.*, 2016; Rosales-Mora, 2020; Soto-Jara, 2022; Tirape-Hidalgo, 2022). Los esfuerzos desarrollados actualmente en Latinoamérica se enfocan en la reducción del uso de herbicidas químicos por medio de la disminución del área de aplicación (Barrios *et al.*, 2011; Garau *et al.*, 2009; Jiménez-Velazco, 2015) y la identificación del área óptima de control químico dentro del sistema productivo (Álvarez *et al.*, 2004; Aparicio *et al.*, 2018; Herrera, 2024).

Por otro lado, existe una creciente presión para prohibir el uso de herbicidas sintéticos en algunos países debido a la evidencia acumulada de sus efectos negativos, su presencia en alimentos y las dificultades para la detección de estos (Alvarado-Prado *et al.*, 2022; Guzmán-Plazola *et al.*, 2016; López-Rojas, 2019; Ramírez-Muñoz *et al.*, 2017). En Costa Rica, se ha prohibido el uso de bromacil, debido a su

presencia en fuentes de agua para consumo humano, situación que ha puesto en riesgo la salud de las comunidades aledañas a plantaciones agrícolas (Vargas, 2019). Si bien la prohibición de los herbicidas contribuirá a reducir la contaminación ambiental, para las personas silvicultoras resulta problemático, ya que les deja sin la herramienta cotidianamente utilizada para el manejo de arvenses. Con base en lo anterior, es necesario desarrollar y validar alternativas más amigables con el ambiente para manejar las plantas arvenses en sistemas silvícolas de *T. grandis*.

Ante este panorama, en la presente investigación desarrollada en la zona de San Carlos y Los Chiles de Alajuela, Costa Rica, se evaluaron dos alternativas al uso convencional de herbicidas químicos; la primera por medio de una cobertura viva de kudzú (*P. phaseoloides* (Roxb.)) y la segunda que propone la reducción del área de aplicación de herbicidas, para limitar la germinación, el crecimiento y propagación de las plantas arvenses (Pozo-Lira *et al.*, 2016) en plantaciones forestales comerciales de *T. grandis*. En el capítulo III de este documento, se desarrollan los resultados correspondientes a los objetivos específicos uno, dos y tres (indicados a continuación), en los cuales se comparan los efectos de cuatro diferentes áreas de aplicación de herbicida sintético; específicamente, los costos, el crecimiento de los árboles de *T. grandis* y se analiza el impacto sobre los grupos tróficos de nematodos. El capítulo IV responde al objetivo específico cuatro, enfocado en el efecto de tres coberturas vivas utilizadas para el manejo de arvenses sobre las propiedades del suelo y en el crecimiento de una plantación de teca de tres años. Finalmente, en el capítulo V se abordan los objetivos específicos cinco y seis, orientados a determinar la densidad de siembra de *P. phaseoloides* que permita un manejo eficiente de las arvenses sin afectar el óptimo desarrollo inicial de *T. grandis*.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Evaluar el efecto de dos métodos alternativos (cobertura viva y reducción de área de aplicación de herbicidas) al uso convencional de herbicidas sintéticos para el manejo de arvenses en plantaciones clonales de teca (*Tectona grandis* L. f.) en San Carlos, Costa Rica.

Objetivos específicos

1. Comparar los costos de insumos y mano de obra en tres tratamientos de reducción del área de control de arvenses con herbicidas con respecto al manejo convencional.
2. Determinar el efecto de la reducción de área aplicada con herbicidas sobre parámetros de crecimiento de árboles clonales de *T. grandis* para la determinación de efectos positivos, negativos o neutros sobre el crecimiento de los árboles.
3. Determinar el impacto de la reducción de área aplicada con herbicidas sobre los grupos tróficos de nematodos en el suelo para la identificación del efecto del herbicida sobre la salud del suelo.
4. Valorar el efecto de tres coberturas vivas de tres años de establecidas sobre las características fisicoquímicas del suelo de una plantación clonal de *T. grandis* para determinar cambios en el tiempo.
5. Evaluar cuatro densidades de siembra de una cobertura viva a base de kudzú (*Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth.) en una plantación clonal de *T. grandis* para la determinación de aquella densidad donde se logre un manejo eficiente de las arvenses.
6. Verificar la influencia de cuatro densidades de siembra de una cobertura viva a base de *P. phaseoloides* sobre parámetros de crecimiento de árboles clonales de *T. grandis* para la determinación de efectos positivos, negativos o neutros sobre el crecimiento de los árboles.

Capítulo II. Marco teórico

Importancia de *Tectona grandis* L. f.

Tectona grandis L. f., conocida como teca, es una especie forestal perteneciente a la familia Lamiaceae. Es natural del sudeste de Asia, donde puede alcanzar hasta 45 metros de altura (Weaver, 2000). En América Central la especie se introdujo por primera vez en Panamá en el año 1926, distribuyéndose posteriormente a los demás países (De Camino *et al.*, 2002). En Costa Rica se tienen registros de plantaciones en Guápiles desde 1941, cultivando posteriormente la especie en Quepos (1943) y Turrialba (1944), debido a que las condiciones climáticas del país (tropical moderadamente húmedo y caliente), permiten el desarrollo de ésta (De Camino *et al.*, 2002; Ladrach, 2009; Murillo *et al.*, 2013; Weaver, 2000).

Actualmente, *T. grandis* es la especie forestal más utilizada en Costa Rica para proyectos de reforestación con fines comerciales. En el 2022 se reportó un área plantada de 49 907 ha (INEC, 2023), donde la Región Huetar Norte representa la segunda zona con mayor área sembrada a nivel nacional (10 955 ha) (Meza-Picado *et al.*, 2019). En 2022, la *T. grandis* representó el mayor volumen de madera en bruto exportada a países como India, China y Vietnam, reportando 158 817 m³ (Ugalde-Alfaro, 2023).

La madera de *T. grandis* se caracteriza por su durabilidad, trabajabilidad, no presentar problemas de agrietamiento o torcedura, poseer una densidad de entre 0,63 y 0,65 g/cm³ al secarse al aire y un peso específico básico de 0,58, lo que la clasifica como pesada (Castro y Raigosa, 2000; Mora y Hernández, 2007; Moya-Roque *et al.*, 2010). La madera joven se utiliza en forma rolliza para vigas, horcones de ranchos turísticos y pisos. Por su parte, las trozas con diámetros de entre 14 y 30 cm son exportadas en rollo (Serrano-Montero y Moya-Roquea, 2011). Dentro de los principales usos de la madera madura destacan la construcción naval, construcción, puentes, muebles, entre otros (Álvarez,

2019). Es considerada como una especie de rápido crecimiento con turno de corta de 15 a 20 años, el cual ha ido disminuyendo gracias a la silvicultura clonal y a los avances en el mejoramiento genético.

Silvicultura clonal

En Costa Rica, los primeros esfuerzos de mejoramiento genético en *T. grandis* se realizaron en 1980 a través de rodales semilleros, que posteriormente se convirtieron en un banco de germoplasma. En 1990, diversas compañías del país importaron germoplasma en pequeños lotes de poblaciones nativas y razas locales de Tailandia (Murillo *et al.*, 2013).

Los esfuerzos de replicar material genético de árboles con características sobresalientes están vinculados al aumento en la producción maderera. La principal razón para clonar un árbol “plus” es que se logra capturar el 100 % de su información genética, caso contrario sucede cuando se toma una semilla del árbol donde la progenie captura únicamente el 50 % de su madre o árbol plus seleccionado (Murillo *et al.*, 2013). Algunas de las características fenotípicas que se buscan en la selección de los árboles involucran el desempeño de crecimiento, salud, resistencia a plagas y enfermedades, características mecánicas y químicas de la madera, entre otros (Montenegro *et al.*, 2013).

Actualmente, se han desarrollado programas de producción de material vegetativo que procede de árboles seleccionados, los cuales son identificados, reproducidos por estaca y almacenados en huertos clonales. Estos individuos son utilizados en ensayos clonales de reforestación para seleccionar los individuos que muestran las características deseadas en diversas condiciones edafoclimáticas (Barrantes-Madrigal *et al.*, 2021; Molina-Segura, 2017; Molina-Quesada *et al.*, 2019; Montenegro *et al.*, 2013). Las ganancias en diámetro (14-23 %) y volumen comercial (35-60 %), mostradas en diversos ensayos clonales de *T. grandis*, permiten observar la importancia de incorporar material vegetativo

seleccionado en las plantaciones forestales para aumentar la productividad y disminuir los turnos de corta (Chaves-Vazques, 2017; Molina-Segura, 2017).

El material genético es uno de los componentes que definen el éxito de una plantación forestal y para ello, el mejoramiento y selección de genotipos superiores, son indispensables para una óptima producción de madera. No obstante, es necesario considerar el componente suelo y el manejo silvicultural como elementos fundamentales para el establecimiento y mantenimiento. En la silvicultura de plantaciones es necesario el manejo de las plantas arvenses para evitar la competencia e interferencia inicial y así buscar asegurar una alta productividad.

Manejo de plantas arvenses en plantaciones forestales

Las plantaciones forestales requieren de manejo silvicultural para obtener mayor ganancia en la producción de madera. Se considera que la selección del sitio, preparación del suelo previo a plantar, manejo de arvenses, enmiendas nutricionales, manejo de plagas y enfermedades, podas y raleos son las actividades más importantes (Briscoe, 1995). Específicamente, el manejo de plantas arvenses ha sido una lucha constante entre el productor y la naturaleza misma, debido a que el silvicultor percibe a todas las arvenses como competencia para el cultivo forestal. No obstante, algunas arvenses que se desarrollan en las plantaciones forestales son benéficas y pueden ser acompañantes de los cultivos forestales (Castillo-Mora, 2024).

Las plantas arvenses constituyen el primer estado de sucesión de plantas donde la vegetación ha sido disturbada, por lo que es común observarlas en áreas de cultivo donde el suelo está desnudo y las lluvias promueven la germinación del banco de semillas (Alemán-Zeledón, 2004). Debido a su constante reproducción en las áreas de cultivo, han sido consideradas como plantas competidoras por factores como nutrientes del suelo, el agua y la luz, además se consideran hospederas de insectos y patógenos

que afectan las plantas de los cultivos (Blanco-Baldes, 2016). Sin embargo, esta vegetación brinda ventajas al ecosistema como la protección de los suelos contra la erosión, regulación de la escorrentía, conservación de la biodiversidad genética, ser fuentes de alimento para humanos y animales, servir para usos medicinales y reducir los costos de manejo (Blanco-Baldes, 2016; Blanco y Leyva, 2007).

Área óptima de control

El manejo más efectivo y común de las arvenses en los primeros años de las plantaciones forestales se hace con aplicaciones de herbicidas sintéticos en la totalidad del área sembrada y no con la remoción manual de las mismas, ya que con este último método las plantas vuelven a crecer en menor tiempo. Estudios recientes han demostrado que el desarrollo de los árboles de *T. grandis*, de la siembra a un año, es mayor en sitios donde el área de aplicación fue total (Herrera-Mejía, 2024). Este mismo resultado se ha mostrado en estudios con otras especies forestales de *Eucalyptus globulus*, *Pseudotsuga menziesii*, *Fagus sylvatica* y *Pinus radiata* (Adams, 2003; Coll *et al.*, 2004; Garau *et al.*, 2009; George y Brennan, 2002; Harper *et al.*, 2005; Kogan y Figueroa, 1999). Sin embargo, en Chile, para *P. radiata*, los resultados mostraron que, al realizar una primera aplicación de herbicida total en el área, seguida por una aplicación de herbicida a los dos años en el área total o en franjas de 2 m, no se tienen diferencias significativas en la altura y diámetro de los árboles (Kogan y Figueroa, 1999).

Comúnmente se ha recomendado aplicar herbicida previo a plantar, cubriendo todo el terreno y unos tres meses posteriores a ello, a fin de que el tamaño de los árboles supere el de las arvenses (Alvarado y Mata, 2013). Los herbicidas utilizados en plantaciones forestales cuentan con diferentes características que ayudan a eliminar las arvenses de diferentes grupos botánicos o en diferentes estados de desarrollo.

Herbicidas sintéticos

Los herbicidas pueden ser clasificados de diferentes formas según su modo de acción, su estructura química y su grado de selectividad (Rosales y Esqueda, 2022). De esta manera, los herbicidas, basados en su modo de acción, pueden ser de contacto, sistémicos, de efecto residual o selectivos. El grado de selectividad define los herbicidas que no discriminan entre las plantas a combatir y aquellos que funcionan para la eliminación específica de arvenses de hoja ancha o angosta (Rosales y Esqueda, 2022).

En los cultivos forestales de *T. grandis* se utilizan mezclas de herbicidas no selectivos y con modos de acción principalmente sistémicos como el glifosato y el metsulfuron metilo. Según Herrera-Mejia (2024), las dosis normalmente empleadas son de 2 L de glifosato (712 g de ingrediente activo (i.a.)) y 20 g de metsulfuron metilo (60 % i.a.) por cada 200 L de agua. Esta dosis permite eliminar la mayoría de arvenses por un periodo de hasta cuatro meses, sin embargo, esta aplicación también afecta los diversos grupos de organismos del suelo como microorganismos, nematodos y en general la salud edáfica (Avellanada, 2022; Ramírez-Muñoz, 2021).

Efectos del glifosato en la salud del suelo

La aplicación de glifosato provoca efectos negativos en el suelo, ya sea de manera directa o a través de la alteración de las comunidades microbianas. En Costa Rica, se demostró que los residuos de plaguicidas en zonas de plantaciones bananeras, entre estos el glifosato, se acumulan en los suelos, lo que impacta negativamente en los organismos del suelo, incluidos los nematodos (Castillo *et al.*, 2009). Los residuos de glifosato reducen la diversidad de nematodos, lo que afecta el equilibrio ecológico y la capacidad del suelo para mantener su fertilidad natural. Además, el glifosato altera la comunidad microbiana del suelo, lo que indirectamente afecta a los nematodos, reduciendo así los

microorganismos beneficiosos, ocasionando la disminución de la disponibilidad de nutrientes y alteración de las interacciones biológicas (Kremer y Meas, 2009; Zobiode *et al.*, 2011).

Por su parte, Zeller *et al.* (2014), demostraron que el uso de glifosato afecta a los hongos micorrízicos, a las lombrices de tierra, y las dinámicas subterráneas que involucran a los nematodos. Los cambios en estas interacciones afectan la estructura del suelo y disminuyen la capacidad de los nematodos para desempeñar su papel en el ciclo de nutrientes y el control de patógenos en el suelo, lo que puede resultar en un ecosistema más desequilibrado. Por ello, es necesaria la búsqueda de alternativas agroecológicas que permitan un manejo de arvenses y el desarrollo del cultivo agrícola y forestal.

Agricultura ecológica

Desde 1970 se utiliza el término Agroecología para denominar una disciplina que integra principios ecológicos en la agricultura, promoviendo sistemas agrícolas sostenibles y equitativos, basados en la comprensión de los procesos biológicos y ecológicos en los agroecosistemas. Su finalidad es la disminución de los riesgos ambientales y económicos mientras se mantiene la base productiva a través del tiempo (Hecht, 1999). A partir de 1990, la Agroecología comienza a integrar conceptos sociales, económicos y políticos en su análisis, convirtiéndose en una ciencia multidisciplinaria para enfrentar los problemas causados por la agricultura convencional. Aborda también los conceptos de desarrollo económico aplicados en dichos sistemas de producción con el fin de iniciar una construcción de conceptos integrados desde la Sociología, la Antropología, la Agronomía, la Ecología y la Política (Monje-Carvajal, 2011).

En términos ecológicos, la agricultura ecológica opta por un equilibrio en el sistema donde la presencia de organismos no deseados o poca nutrición son síntomas de desbalances ecológicos que

pueden ser abordados desde el mismo funcionamiento del sistema productivo. Por otra parte, los sistemas agrícolas convencionales buscan el incremento de la productividad agrícola, eliminando en el proceso a los insectos y las plantas acompañantes (considerados como plagas y arvenses respectivamente), además de incorporar constantemente insumos externos para aumentar la nutrición del suelo (Daza-Cruz, 2020).

Entre las alternativas agroecológicas aplicables en cultivos forestales para el manejo de las llamadas “malezas”, destacan el uso de coberturas vivas, principalmente con especies leguminosas (fabáceas) que mejoran las características del suelo y suprimen las plantas arvenses.

Coberturas vivas

Las coberturas vivas se utilizan para ayudar al cultivo principal en la mejora de las características del suelo como fertilidad, disponibilidad de nutrientes y agua, protección de la lluvia, radiación solar, temperatura, humedad, erosión por escorrentía, mejora de la microfauna y la estructura, debido a que rompen las capas compactadas (FAO, 2021; Mendoza-Dávalos *et al.*, 2021; Ramírez-Muñoz, 2021). Adicionalmente, la diversidad de plantas ayuda a controlar algunas plagas y enfermedades asociadas al cultivo; funcionan como fuente de alimentación humana y animal (Montoya-Macías, 2022) y ayudan a suprimir la germinación y el crecimiento de las otras plantas arvenses, debido a que disminuyen el ingreso de luz a la superficie del suelo (Ramírez-Muñoz, 2021).

Se han realizado diversos estudios sobre el uso de coberturas para el manejo de plantas arvenses, principalmente en cultivos agrícolas perennes. Por ejemplo, en café se utilizó *Crotalaria spectabilis* con dos métodos de siembra de la semilla; dejándola sobre el suelo sin tapar y sembrada. Sin embargo, el porcentaje de cobertura no fue lo suficientemente alto para superar y manejar las plantas arvenses (Chaves-Sánchez, 2018). En Honduras se implementó *C. juncea* en un ensayo, presentando a

los 65 dds una disminución del 21 % en la población de ciperáceas, 45 % de especies de hoja ancha y 81 % de gramíneas en comparación con los 15 dds (Gómez-Pesantes y Lara-Cedeño, 2016).

En Costa Rica, estudios realizados en plantaciones de banano concluyeron que la incorporación de coberturas vivas disminuye la compactación y la temperatura del suelo, aumenta la actividad microbiana, disminuye la erosión hídrica y reduce la pérdida de la capa fértil del suelo (Valverde *et al.*, 2023). De igual forma, en plantaciones de café se han identificado beneficios como aporte de N al suelo y aumento de la captura de carbono al utilizar coberturas nativas e introducidas como *C. spectabilis* (Gutierrez, 2023). En plantaciones de cacao la especie vegetal *Geophila macropoda* logró a los 60 dds una cobertura de entre 87,5 y 77,5 % para distanciamientos de siembra de 40 y 80 cm, respectivamente (Cañizares y Villafuerte, 2021). En Ecuador se utilizó *P. phaseoloides* en cuatro densidades (0,5 × 0,5; 0,75 × 0,75; 1,0 × 1,0 y 1,5 × 1,5 m) en plantaciones de cacao, mostrando a los 150 dds una cobertura de entre 96 y 100 % (Pozo-Lira *et al.*, 2016). Por otro lado, contrario a lo pensado sobre las arvenses como hospederas de enfermedades y plagas, en Costa Rica las coberturas de *Vigna radiata*, *P. phaseoloides* y *Crotalaria* sp. no mostraron incidencia de la enfermedad causada por *Olivea tectonae* y la plaga de *Rhabdopterus* sp. en *T. grandis* de un año (Arguedas *et al.*, 2018).

Características de *Pueraria phaseoloides* (Kudzú) y su efecto en el suelo

La *P. phaseoloides* es una planta trepadora de la familia de las leguminosas (Fabácea) cuyos usos han sido el manejo de arvenses (Fuentes-Molina *et al.*, 2023; Tirape-Hidalgo, 2022), la recuperación de suelos degradados mediante la fijación de N (Pulgar, 2013), como forraje para animales y producción de alimentos, entre otros (Dueñas-Cotrino, 2021). En Costa Rica existe experiencia en el manejo de *P. phaseoloides* como cobertura viva en el cultivo de palma aceitera, donde se destaca el efecto positivo como atrayente de la entomofauna benéfica (Mexon y Chinchilla, 2003). Además, la *P. phaseoloides* ha

generado beneficios como el aporte de N, la mejora de la fertilidad y protección del suelo, dentro del marco de alternativas resilientes ante el cambio climático (Castillo-Mora, 2024; Vignola *et al.*, 2017).

En plantaciones forestales de *T. grandis* se han registrado efectos positivos de la cobertura de *P. phaseoloides*, al aumentar la diversidad de macrofauna del suelo, mejorar la incorporación de MO y aumentar la dinámica de su descomposición. En este sentido, Rosales-Mora (2020), registró que al utilizar *P. phaseoloides* como cobertura, la diversidad de detritívoros, omnívoros y herbívoros aumentó, mejorando significativamente las propiedades físicas y químicas del suelo. Por su parte, Yauri (2019), observó que en suelos degradados aumentaron los contenidos de K y N hasta en un 50 % solo al colocar la cobertura de *P. phaseoloides* sobre el suelo, mientras que, al combinar la cobertura con compost o cal dolomita, ambas variables triplicaron su contenido en el suelo.

Capítulo III. Efecto del área mínima de control de arvenses sobre el desarrollo de árboles, los costos de aplicación y la población de nematodos en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L. f.

Resumen

[Introducción] El manejo de arvenses en monocultivos de *Tectona grandis* es un factor determinante para garantizar su adecuado desarrollo y productividad maderable. [Objetivo] Se evaluó el efecto de diferentes áreas de aplicación de herbicida sintético sobre el crecimiento de *T. grandis*, los costos asociados y la dinámica de los grupos tróficos de nematodos como indicadores de salud del suelo. [Metodología] La investigación se realizó en dos plantaciones forestales en Pocosol de San Carlos (localidades de Banderas y San Cristóbal). Se establecieron 16 parcelas por sitio (576 m² con 36 árboles cada una) y se aplicaron cuatro tratamientos: aplicación en área total, en franjas de 2,4 m, franjas de 1,2 m y rodajas de 1,2 m, cada uno con cuatro repeticiones. Se midieron variables dasométricas, tiempos y costos de aplicación, así como la abundancia de grupos tróficos de nematodos antes y después de aplicados los tratamientos. Las evaluaciones se realizaron a los tres años de establecido el ensayo. [Resultados] La aplicación de herbicidas en franjas de 1,2 m y 2,4 m promovió un crecimiento adecuado de *T. grandis* y redujo el uso de herbicida en un 68 y 25 % en Banderas y San Cristóbal, respectivamente, en comparación con la aplicación total. El tiempo y la cantidad de herbicida requerido aumentaron proporcionalmente con el área de manejo. En ambos sitios, los grupos tróficos de nematodos se distribuyeron en el orden: fitoparásitos > bacteriófagos > depredadores > micófagos, sin diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, al analizar cada tratamiento de forma individual, se observaron diferencias significativas en las poblaciones de fitoparásitos en franjas de 2,4 m y rodajas, y en depredadores bajo aplicación total, al comparar los muestreos antes y después de la aplicación. [Conclusión] La aplicación de herbicida sintético en franjas de 1,2 m o 2,4 m constituye una estrategia viable para el manejo de arvenses en plantaciones de *T. grandis*, al optimizar el crecimiento de los

árboles, reducir costos y minimizar la descarga de agroquímicos, sin comprometer la salud biológica del suelo.

Palabras claves: alternativa agroecológica; arvenses; grupo trófico; herbicida sintético; manejo; nematodos.

Abstract

[Introduction] Weed management in *Tectona grandis* monocultures is a determining factor in ensuring adequate development and timber productivity. [Objective] The effect of different areas of synthetic herbicide application on the growth of *T. grandis*, the associated costs, and the dynamics of nematode trophic groups as indicators of soil health were evaluated. [Methodology] The research was conducted in two forest plantations in Pocosol de San Carlos (localities of Banderas and San Cristóbal). Sixteen plots were established per site (576 m², 36 trees each) and four treatments were applied: total application, 2.4 m strips, 1.2 m strips, and slices, each with four replicates. Dasometric variables, application times and costs, as well as the abundance of nematode trophic groups before and after the treatments were applied, were measured. The evaluations were carried out three years after the trial was established. [Results] The application of herbicides in 1.2 m and 2.4 m strips promoted adequate growth of *T. grandis* and reduced herbicide use by 68 and 25 % in Banderas and San Cristóbal, respectively, compared to total application. The time and amount of herbicide required increased proportionally with the area under management. At both sites, the trophic groups of nematodes were distributed in the order: plant-parasitic nematodes > bacteriophages > predators > mycophages, with no significant differences between treatments. However, when analyzing each treatment individually, significant differences were observed in plant-parasitic nematodes populations in 2.4 m strips and slices, and in predators under total application, comparing samples before and after application. [Conclusion] The application of synthetic herbicide in 1.2 m or 2.4 m strips is a viable strategy for weed management

in *T. grandis* plantations, optimizing tree growth, reducing costs, and minimizing agrochemical discharge without compromising soil biological health.

Keywords: agroecological alternative; management; nematodes; synthetic herbicide; trophic group; weeds.

Introducción

La especie forestal *Tectona grandis* (teca) constituye uno de los pilares de los programas de reforestación en Costa Rica y representa alrededor del 60 % de la actividad silvicultural nacional (Meza *et al.*, 2019). Para el año 2024 se reportaron 50 066 ha plantadas en el país (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2024). Introducida en 1941, la especie ha sido objeto de un amplio número de investigaciones que han permitido generar conocimiento sobre productividad y volumen mediante índices de sitio, selección clonal, dinámica del carbono orgánico en el suelo, estimaciones de biomasa, entre otros aspectos relevantes para su manejo y aprovechamiento (Barrantes-Madrigal *et al.*, 2021; Cortés-Cortés *et al.*, (prensa); De Camino *et al.*, 2002; Fonseca-González *et al.*, 2021; Murillo *et al.*, 2013; Pérez-Poveda, 2025).

El adecuado desarrollo de *T. grandis* requiere un manejo silvicultural integral que incluye fertilización, encalado, podas, raleos y control de arvenses (Fallas-Zúñiga, 2014; Loría-Maroto, 2017). El control de arvenses es particularmente relevante, ya que pueden competir por agua, luz y nutrientes, además de actuar como hospederas de plagas y patógenos que afectan la productividad de los monocultivos (Alvarado y Mata, 2013; Blanco-Baldes, 2016; Da Ponte y Salas, 2013; Gómez y Reiche, 1998; Martínez, 2015). Entre las alternativas para el manejo de arvenses, evaluadas recientemente destacan las coberturas vivas con especies como *Pueraria phaseoloides*, *Vigna radiata*, *Desmodium* sp. y *Crotalaria juncea*, aunque la práctica más extendida sigue siendo la aplicación de herbicidas sintéticos,

tanto preemergentes como postemergentes (Cortés-Cortés *et al.*, (prensa); Guevara, 2011; Hernández-Rodríguez, 2017).

Los herbicidas más comunes en sistemas forestales y agrícolas incluyen glifosato (ácido fosforoso), paraquat (bipiridilo), 2,4-D (hormonal) y diuron (urea), ampliamente señalados por sus impactos ambientales negativos (Alvarado-Prado *et al.*, 2022). A pesar de ello, la supresión total del uso de herbicidas puede comprometer la productividad forestal, ya que en especies como *Eucalyptus globulus*, *Pseudotsuga menziesii*, *Fagus sylvatica* y *Pinus radiata* se ha demostrado que el control de arvenses favorece significativamente su crecimiento (Coll *et al.*, 2004; Garau *et al.*, 2009; Harper *et al.*, 2005; Kogan y Figueroa, 1999). En consecuencia, diversos estudios latinoamericanos han explorado alternativas para optimizar el área de control químico y reducir la dependencia hacia herbicidas (Aparicio *et al.*, 2018; Barrios *et al.*, 2011; Garau *et al.*, 2009; Jiménez-Velazco, 2015).

Una valoración integral del manejo químico de arvenses requiere considerar variables adicionales como el crecimiento de los árboles, los costos asociados y los impactos sobre la biota edáfica. En este sentido, existe evidencia de que los herbicidas alteran las propiedades biológicas y físicas del suelo al reducir la cobertura vegetal, donde afectan comunidades de lombrices, microorganismos y nematodos (Kremer y Meas, 2009; López *et al.*, 2018; Orozco-Bundis, 2006; Pozo-Lira *et al.*, 2016; Zeller *et al.*, 2014; Zobiode *et al.*, 2011). Los nematodos, en particular, se emplean como bioindicadores de la calidad del suelo debido a su diversidad funcional y a las múltiples interacciones que mantienen con bacterias, hongos, plantas y otros organismos. Algunos grupos funcionales muestran una especial sensibilidad a las alteraciones edáficas, lo que permite utilizarlos para detectar cambios en las condiciones ambientales y en el manejo del suelo (Melakeberhan *et al.*, 2021; Salas, 2019).

Explorar nuevos enfoques de manejo adaptados a la realidad forestal permite ofrecer estrategias más sostenibles a los productores. En este contexto, la presente investigación evaluó la

influencia del área de aplicación de herbicidas sintéticos sobre el crecimiento de *T. grandis*, los costos asociados y la estructura de los grupos tróficos de nematodos en el suelo.

Metodología

Área de estudio

El estudio se realizó en dos fincas de producción forestal ubicadas en Banderas (10°50'47"N 84°31'23"W) y San Cristóbal (10°49'16"N 84°30'39"W), ambos del distrito de Pocosal, en el cantón de San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Esta región corresponde, según la clasificación de zonas de vida de Holdridge R., a un bosque húmedo tropical en transición hacia pre húmedo y bosque húmedo tropical, con temperaturas que oscilan entre 24 a 30 °C y una precipitación anual de 2 000 a 4 000 mm (Rodríguez *et al.*, 2013). El suelo es en su mayoría del orden ultisol, el cual presenta un alto contenido de Al extraíble, bajos contenidos de Ca y son arcillosos (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA], 2016).

Diseño experimental y tratamientos

En el año 2021 se establecieron dos experimentos de área mínima de control de arvenses con herbicida sintético en los dos sitios: Banderas y San Cristóbal, con monocultivo clonal de *T. grandis* (Salazar-Ruiz *et al.*, 2025). En cada experimento se aplicaron cuatro tratamientos (Tabla 1) en cuatro bloques (repeticiones) completos al azar. El área total de cada experimento fue de 9 216 m² distribuido en 16 parcelas de 576 m² dentro de las cuales se evaluaron 36 árboles de *T. grandis*, sembrados a una distancia de 4 × 4 m.

Los tratamientos consistieron en el establecimiento de diferentes áreas de aplicación de herbicidas sintéticos. El tratamiento de menor área fue la rodaja, en la cual se realizó una aplicación circular con un diámetro de 1,2 m alrededor de cada árbol, permitiendo la permanencia del 93 % de la

vegetación en la plantación. Los tratamientos de aplicación en franjas consistieron en una aplicación continua sobre la línea de siembra de los árboles en una misma dirección, con una anchura de 1,2 ó 2,4 m. El último tratamiento (testigo) consistió en la eliminación completa de las arvenses mediante la aplicación de herbicida en el área total experimental.

Es importante detallar que en el experimento de Banderas se realizó una aplicación de herbicida sintético en toda la plantación previamente a la plantación de los árboles y las aplicaciones de los tratamientos iniciaron tres meses después de plantados los árboles. En el experimento de San Cristóbal se realizó la aplicación del herbicida de acuerdo con los tratamientos establecidos antes de la siembra de los árboles. Previo a esta aplicación se efectuaron chapeas manuales con el fin de reducir la altura de las arvenses presentes las cuales mostraron un mayor desarrollo en comparación con el sitio Banderas (Tabla 1).

Tabla 1

Características de los tratamientos a evaluar y área de aplicación de herbicida sintético en los experimentos de área óptima de control.

Tratamiento	ID	Caracterización	Aplicación en la parcela (m ²)	Área de aplicación (m ² /ha)	Área cubierta (%)
Rodajas	R	36 rodajas circulares alrededor de cada árbol con un radio de 0,6 m.	40,7	706,9	93
Franja de 1,2 m	F_1,2	6 bandas lineales en los árboles con una anchura de 1,2 m.	172,8	3 000	70
Franja de 2,4 m	F_2,4	6 bandas lineales en los árboles con una anchura de 2,4 m.	345,6	6 000	40
Aplicación total	T	Aplicación en toda el área de la plantación.	576	10 000	0

Nota. Elaboración propia, 2025.

Aplicación de los tratamientos

Durante los tres años de crecimiento de los árboles, en ambos sitios (Banderas y San Cristóbal), se realizaron cinco aplicaciones de herbicida sintético en los meses 3, 6, 12, 24 y 48 (Tabla 2), las dosis aplicadas fueron las recomendadas por los fabricantes. Adicionalmente, durante el crecimiento de la plantación forestal se aplicaron dosis de fertilizante granulado 10-30-10 (N-P-K), encalado, manejo silvicultural de podas y apuntalado.

Tabla 2

Herbicidas y dosis de i.a utilizadas por hectárea en las fincas de San Cristóbal y Banderas, San Carlos, Costa Rica.

Finca	Producto	Ingrediente activo	Dosis i.a. (kg/ha)
San Cristóbal	Herbicida sintético	Glifosato-isopropilamonio	0,96
	Herbicida sintético	Metsulfuron metil	0,012
	Coadyuvante	¹ Esteres metilados de ácidos grasos*	-
Banderas	Herbicida sintético	Glifosato-isopropilamonio	0,96
	Herbicida sintético	Oxifluorfen	0,36
	Coadyuvante	² Esteres metilados de ácidos grasos*	-
	Regulador de pH	² Tecnophyt pH+*	-

Nota. *Características del producto utilizado; ¹ dosis de 0,2 L/ha, ² dosis de 0,5 L/ha. Elaboración propia, 2025.

Variables evaluadas

Desarrollo de los árboles.

A los tres años después de siembra (ads), se evaluó el desarrollo de los árboles mediante la medición de altura total con el uso de clinómetro Suunto y del diámetro a la altura del pecho (DAP) a 1,3 m de altura con cinta diamétrica. Se calculó el volumen de los árboles según tratamiento con un factor de forma de 0,55 propuesto por Aguilar (2017).

Población de grupos tróficos de nematodos.

Durante el periodo de la investigación, se realizaron dos análisis de la comunidad de grupos tróficos de nematodos en el suelo: bacteriófagos, depredadores, fitoparásitos y micófagos. Los muestreos para ambos análisis se realizaron tres años después de siembra, el primero antes de aplicar herbicida y el segundo análisis se realizó 15 días posteriores a la aplicación. El análisis de nematodos pre y post aplicación de herbicida buscó determinar si existía disminución, aumento o estabilidad en los grupos tróficos de nematodos en el área de aplicación entre las fechas evaluadas.

En cada parcela se realizaron 4 submuestreos a 5 cm de profundidad, recolectando 250 g de suelo aproximadamente. Las muestras se homogeneizaron para tener una muestra compuesta para cada parcela. En las parcelas donde se aplicó herbicida en el área total, el submuestreo se realizó al azar. En los tratamientos donde el herbicida se aplicó en franjas de 1,2 m y 2,4 m, las submuestras se obtuvieron en la parte central de cada franja; mientras que, en las rodajas, se realizó a 10 cm de la base de cada uno de cuatro árboles distribuidos de manera diagonal. Para los dos sitios experimentales y los dos tiempos de muestreo se obtuvo un total de 64 muestras, que fueron llevadas al Laboratorio de Nematología de la Universidad Nacional de Costa Rica para la determinación de grupos tróficos y la identificación a género de los principales nematodos fitoparásitos presentes.

Costo de aplicación.

Los costos de aplicación de herbicida sintético por tratamiento se calcularon mediante las variables de: tiempo de aplicación, mano de obra y tipo de herbicida utilizado. Para ello se cronometró el tiempo requerido por el personal de campo y el volumen aplicado de herbicida en cada tratamiento. Para la finca San Cristóbal se incluyó el tiempo y los costos de las chapeas manuales de las arvenses según el tratamiento. Los precios de los productos utilizados en las fincas se obtuvieron según datos reportados por agroservicios locales. Los datos de costos se extrapolaron a una hectárea para

determinar el pago de la mano de obra, establecido en \$32,44 por jornal. Este precio corresponde al salario base de \$26,1 más un 24,34 % correspondiente a cargas sociales (Ministerio de Trabajo y Seguridad Social [MTSS], 2025), además de los costos locales de los productos utilizados. Los costos en dólares se hicieron al tipo de cambio de 510 colones costarricenses por dólar americano.

Análisis de datos

Los datos se analizaron con el programa R-Studio, mediante una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y un Análisis de Varianza (ANDEVA). Los datos de altura, DAP y volumen de los árboles, así como el tiempo de aplicación de los herbicidas y chapea, fueron analizados mediante la prueba de medias Kruskal-Wallis con un nivel de confianza del 95 %. Los datos de las poblaciones de nematodos fueron analizados mediante un ANDEVA con pruebas de medias usando la diferencia entre los datos de nematodos por grupo trófico previa y posterior a la aplicación de herbicida sintético en cada tratamiento. Adicionalmente, se hizo una prueba t-student para muestras pareadas a un 95 % de confiabilidad, comparando la línea base de cada tratamiento y grupo trófico con los resultados post aplicación.

Resultados y discusión

Efecto del área de aplicación de herbicidas sobre el desarrollo de los árboles

El crecimiento de los árboles de *T. grandis* a los tres años dds varió en los dos experimentos evaluados según el área de aplicación de herbicida. La altura, DAP y volumen promedio de los árboles de *T. grandis* fue de 11,01 m, 11,18 cm y 35,55 m³/ha en la finca de Banderas. En general estos valores fueron mayores con respecto a los registrados en la finca de San Cristóbal, donde se obtuvieron valores promedio de 8,74 m, 9,79 cm y 21,81 m³/ha, respectivamente. En ambas fincas el DAP, la altura y el

volumen total fueron menores en el tratamiento de aplicación en rodajas, mientras que la aplicación de herbicida en franjas o en el área total se tradujo en mejores rendimientos.

Los valores de las variables dasométricas evaluadas se incrementaron conforme se amplió el área de control, sin embargo, algunos tratamientos no difirieron significativamente (Tabla 3). En Banderas, se evidenció que la aplicación de herbicida en franjas de 1,2 m, franjas de 2,4 m o aplicación en el área total, no produjo diferencias en el desarrollo dasométrico de *T. grandis* ($p > 0,05$). La diferencia porcentual en la variable de volumen fue del 7,3 y 12,5 % menos para franjas de 2,4 m y franjas de 1,2 m con respecto a la aplicación total. Por su parte, la aplicación en rodajas presentó los menores valores en crecimiento dasométrico ($p < 0,05$), con una diferencia porcentual con respecto a la aplicación en área total del 6 % en altura, 9,3 % en DAP y 24,2 % en volumen, la cual fue significativa ($p=0,0001$; $p<0,0001$; $p=0,039$, respectivamente) (Tabla 3).

Tabla 3

Caracterización dasométrica de las plantaciones clonales de T. grandis de 3 años de edad, según área de aplicación de herbicidas, Costa Rica.

Experimento	Trat.	n	Altura (m)			DAP (cm)			Volumen (m ³ /ha)		
			Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx
Banderas	R	142	6,6	10,6 ^b ±1,3	13,6	6,2	10,5 ^b ±1,6	13,7	27,3	32,8 ^b ±3,9	36,5
	F_1,2	140	5,6	11,1 ^a ±1,2	13,3	5,3	11,2 ^a ±1,6	14,6	34,0	38,0 ^{ab} ±3,0	41,2
	F_2,4	141	7,2	11,2 ^a ±1,3	14,2	6,8	11,4 ^a ±1,7	16,2	35,9	40,2 ^{ab} ±5,4	47,2
	T	143	6,8	11,3 ^a ±1,5	14,2	7,3	11,6 ^a ±2,0	16,1	39,7	43,3 ^a ±4,4	49,8
General		614	5,6	11,0	14,2	5,3	11,2	16,2	27,3	35,6	49,8
San Cristóbal	R	128	3,1	8,0 ^c ±2,1	13,9	4,0	8,5 ^d ±1,7	12,5	10,0	15,2 ^c ±4,9	20,8
	F_1,2	137	3,2	8,6 ^b ±2,0	13,1	5,1	9,3 ^c ±1,8	13,0	17,5	21,0 ^{bc} ±3,9	26,5
	F_2,4	141	3,1	9,1 ^{ab} ±1,8	16,0	6,0	10,2 ^b ±1,8	17,0	23,2	26,7 ^{ab} ±2,4	28,4
	T	139	2,0	9,3 ^a ±2,1	14,6	5,5	11,1 ^a ±1,7	14,6	24,3	31,8 ^a ±5,7	37,3
General		591	2,0	8,7	16,0	4,0	9,8	17,0	10,0	21,8	37,3

Nota. Trat.: tratamiento; R: rodajas de 1,2 m; F_1,2: franjas de 1,2 m; F_2,4: franjas de 2,4 m; T: total; n: número de árboles por tratamiento; DAP: diámetro a la altura de pecho; Mín: mínimo; Máx: máximo, $\bar{x}$: promedio. Elaboración propia, 2025.

El experimento de San Cristóbal mostró que la aplicación de herbicida en franjas de 2,4 m y en el área total, permitió que los árboles se desarrollaran adecuadamente a los tres ads (Tabla 3). La altura y el volumen de los árboles en los tratamientos de control total y franjas de 2,4 m no presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$). Por su parte, las rodajas y franjas de 1,2 m mostraron una disminución en la altura del 14,4 y 7,4 %, y en el volumen del 52 y 33,8 % con respecto a la aplicación en el área total ($p < 0,0001$; $p=0,012$). El DAP varió entre los tratamientos, mostrando diferencias del 24, 16 y 8 % menores para las rodajas, franjas de 1,2 y franjas de 2,4 con respecto a la aplicación total ($p < 0,0001$; Tabla 3). En esta finca en particular, la quema de los residuos de la cosecha forestal previo a la plantación de la *T. grandis* evaluada pudo propiciar la germinación del banco de semillas presentes debido a los componentes como calor y humo que rompen la latencia y estimulan la germinación de las arvenses, lo cual pudo interferir en el desarrollo inicial de los árboles (Mott *et al.*, 2021; Pausas y Keeley, 2022).

Según los datos de crecimiento de *T. grandis* se determinó que a los tres ads, la cobertura de arvenses en el suelo alcanzó entre un 70 % (Banderas con franjas de 2,4 m) y un 40 % (San Cristóbal con franjas de 1,2 m) sin afectar las variables dasométricas. El manejo de arvenses en los primeros años de crecimiento de la *T. grandis* es primordial, aspecto que se puede explicar mediante el hecho de que, durante este periodo de tiempo en los primeros 30 cm de profundidad la *T. grandis* produce una cantidad significativa de raíces finas (Clément *et al.*, 2019). De igual manera, en los primeros 30 cm del suelo se observó una abundante cantidad de raíces de arvenses, lo que sugiere una fuerte competencia por recursos, especialmente en condiciones de escasos minerales.

Las arvenses se caracteriza por ser superficiales, con alta área foliar específica, floración temprana y de larga duración, lo que les permite adaptarse eficazmente a los constantes disturbios del suelo (Bourgeois *et al.*, 2019). Según Salazar *et al.* (2025), las arvenses más representativas en plantaciones de *T. grandis* de la Región Huetar Norte son *Ischaemum indicum*, *Phyllanthus urinaria*, *Homolepis arborescens*, *Spermacoce remota*, *Scleria pterota*, *Desmodium incanum*, *Mimosa pudica*, entre otras. Por lo tanto, el control de arvenses (eliminación de raíces superficiales) cercanas a las raíces en crecimiento de *T. grandis*, puede eliminar cualquier tipo de competencia, promoviendo el adecuado desarrollo inicial de los árboles.

Diversos estudios realizados con otras especies forestales han mostrado que la cobertura total de arvenses en el área de cultivo afecta el crecimiento de los árboles. En Chile el crecimiento (DAP y altura) en plantaciones forestales de *P. radiata* de 4 a 6 años fueron similares entre tratamientos de aplicación de área total y franjas de 2 m con aplicaciones de 3 a 4 L/ha de glifosato a los 0, 1 y 2 años (Álvarez *et al.*, 2004). Para la misma especie forestal, se encontró que al realizarse manejo total de las arvenses en el año uno, seguido por una aplicación en franjas de 2 m o una aplicación total en el año dos, no se presentaron diferencias significativas en las variables dasométricas (Kogan y Figueroa, 1999).

Sobre este mismo tema, Aparicio *et al.* (2018), identificaron que en plantaciones de *E. grandis* de dos años, el control total mostró mayor crecimiento dasométrico con respecto a franjas de 2,4 m al utilizar glifosato (1,56 L/ha) a los 0, 3, 6 y 12 meses. Resultados similares se encontraron en *E. globulus*, donde en sitios sin arvenses, los árboles tenían hasta tres veces más altura en comparación con sitios con arvenses (Adams *et al.*, 2003). Las características de cada plantación presentan condiciones que pueden influir sobre la biomasa forestal. El programa silvicultural de las especies maderables debe ser integral. Ante ello, Barrios *et al.* (2011), muestran que después de los 15 meses de establecida una plantación de *G. arborea*, las actividades de control de arvenses (3 L/ha de glifosato aplicado de 1 a 3

veces al año) en combinación con fertilizantes, permitieron incrementos anuales significativos, observando un aumento del 22 % para diámetro y 3 % en volumen en comparación al no control de arvenses.

Costo de aplicación de herbicida según área de control

Costos asociados al tiempo de aplicación.

El costo de aplicación de herbicidas está directamente relacionado con el tiempo requerido para su aplicación; lo cual se relaciona directamente con el área de aplicación. La aplicación de herbicida en rodajas y franjas de 1,2 m se tradujo en menor costo. En Banderas, los promedios del tiempo para la aplicación de herbicida en una hectárea forestal fueron de entre 1 hora (rodajas) y 2 horas (aplicación de área total), lo que representó un costo de entre \$5,22 y \$10,13 (Tabla 4). Los tratamientos de aplicación en franjas de 2,4 m, franjas de 1,2 m y rodajas, presentaron una disminución del costo de aplicación del 33, 52 y 48 % con respecto a la aplicación de área total.

La finca San Cristóbal mostró un aumento en el tiempo requerido de aplicación de herbicidas, demostrando mayores costos con respecto a los reportados en Banderas. Dichas diferencias estuvieron influenciadas por la pendiente del terreno, la altura de las arvenses y los restos de las chapeas manuales, que retardaron la labor de aplicación. En esta finca el tiempo promedio de aplicación por hectárea fue de entre 2 y 4 horas para los tratamientos de rodaja y aplicación total, respectivamente. Los costos reportados en la aplicación en franjas de 2,4 m, franjas de 1,2 m y rodajas fueron menores en un 21, 39 y 47 % respectivamente, con respecto a la aplicación total.

Tabla 4

Costos por hectárea asociados al tiempo de aplicación de herbicidas sintéticos según área de control de arvenses en dos fincas productoras de T. grandis en la Zona Norte de Costa Rica.

Exp.	Trat.	Tiempo en 576 m ² (minutos)			Tiempo/ha (horas)			Tiempo/ha(jornal)			Costo/ ha
		Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx	
Banderas	R	3,50	3,90±0,32	4,23	1,01	1,13±0,09 ^{bc}	1,22	0,14	0,16±0,01	0,17	\$5,22
	F_1,2	3,12	3,63±0,41	4,00	0,90	1,05±0,12 ^c	1,16	0,13	0,15±0,02	0,17	\$4,86
	F_2,4	4,73	5,10±0,25	5,27	1,37	1,48±0,07 ^b	1,52	0,20	0,21±0,01	0,22	\$6,84
	T	6,88	7,55±1,10	9,20	1,99	2,19±0,32 ^a	2,66	0,28	0,31±0,05	0,38	\$10,13
General		3,12	5,04±1,70	9,20	1,32	1,46±0,15	1,64	0,19	0,21±0,02	0,23	\$6,76
San Cristóbal	R	6,18	6,74±0,40	7,05	1,79	1,95±0,12 ^c	2,04	0,26	0,28±0,02	0,29	\$9,04
	F_1,2	6,83	7,69±1,16	9,40	1,98	2,23±0,34 ^c	2,72	0,28	0,32±0,05	0,39	\$10,31
	F_2,4	9,10	9,99±0,59	10,33	2,63	2,89±0,17 ^b	2,99	0,38	0,41±0,02	0,43	\$13,39
	T	11,58	12,63±1,01	14,02	3,35	3,65±0,29 ^a	4,06	0,48	0,52±0,04	0,58	\$16,94
General		6,18	9,26±2,47	14,02	2,44	2,68±0,23	2,95	0,35	0,38±0,03	0,42	\$12,42

Nota: Exp.: experimento; Trat.: tratamiento; R: rodajas de 1,2 m; F_1,2: franjas de 1,2 m; F_2,4: franjas de 2,4 m; T: total; Mín: mínimo; Máx: máximo, $\bar{x}$: promedio. Elaboración propia, 2025.

Costos asociados al gasto de herbicidas.

La cantidad de herbicida aplicado por hectárea aumentó conforme se incrementó el área de control ($p < 0,05$; Tabla 5). El tratamiento aplicación de área total, mostró una descarga de herbicidas de 147,6 L/ha y 260,4 L/ha en Banderas y San Cristóbal, respectivamente, siendo este último el más costoso en cuanto a producto utilizado. En la finca Banderas hubo una disminución del volumen de herbicida sintético utilizado del 74, 68 y 52 %, respectivamente, para rodajas, franjas de 1,2 m y franjas de 2,4 m con respecto a la aplicación total. Por su parte, el experimento en San Cristóbal presentó disminuciones del 77, 53 y 25 % con respecto al tratamiento de aplicación de área total para los mismos tratamientos correspondientes.

Tabla 5

Costos por hectárea asociados a la cantidad de herbicida sintético aplicado según área de control de arvenses en dos fincas productoras de T. grandis en la Zona Norte de Costa Rica.

Experimento	Tratamiento	Litros en parcela (576 m ²)	Litros/ha	Costo/ha
Banderas	R	2,25	39,06	\$5,1
	F_1,2	2,75	47,74	\$6,3
	F_2,4	4,13	71,61	\$9,4
	T	8,50	147,57	\$19,4
Promedio		4,41	76,50	\$10,0
San Cristóbal	R	3,50±0,7	60,76±12,3 ^a	\$6,1
	F_1,2	7,00±1,4	121,53±24,6 ^b	\$12,3
	F_2,4	11,25±1,0	195,31±16,6 ^c	\$19,7
	T	15,00±1,6	260,42±28,4 ^d	\$26,3
Promedio		9,19	159,51	\$16,1

Nota. R: rodajas de 1,2 m; F_1,2: franjas de 1,2 m; F_2,4: franjas de 2,4 m; T: total. Elaboración propia, 2025.

Costos del manejo manual de arvenses en finca San Cristóbal.

Dado que en la finca de San Cristóbal se realizó un manejo manual previo a la aplicación de los tratamientos, los tiempos y costos disminuyeron conforme aumentó el área de control químico (Tabla 6). Los tratamientos de aplicación en rodajas, franjas de 1,2 m y franjas de 2,4 m presentaron un aumento en los costos del 108, 95 y 56 % con respecto al control total. El tiempo requerido para el manejo manual de los tratamientos de aplicación total y franjas de 2,4 m fueron similares ($p > 0,05$). Es importante recalcar que este manejo silvicultural no fue requerido en el experimento de Banderas debido a que la altura de las plantas arvenses permitía la aplicación del herbicida sintético de forma directa.

Tabla 6

Costos por hectárea asociados al tiempo de manejo manual realizado según área de control de arvenses en la finca San Cristóbal, Costa Rica.

Trat.	Tiempo 576 m ² (minutos)			Tiempo/ha (horas)			Tiempo/ha (jornal)			Costo/ha
	Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx	
R	28,52	40,55 ±11,51	50,53	8,25	11,73 ^b ±3,33	14,62	1,18	1,68 ±0,48	2,09	\$54,38
F_1,2	34,42	38,03 ±5,35	45,95	9,96	11,00 ^b ±1,55	13,30	1,42	1,57 ±0,22	1,90	\$50,99
F_2,4	25,05	30,35 ±6,08	39,10	7,25	8,78 ^{ab} ±1,76	11,31	1,04	1,25 ±0,25	1,62	\$40,71
T	12,63	19,46 ±4,87	23,53	3,65	5,63 ^a ±1,41	6,81	0,52	0,80 ±0,20	0,97	\$26,10
General	12,63	32,10 ±10,77	50,53	7,28	9,29 ±2,01	11,51	1,04	1,33 ±0,29	1,64	\$43,04

Nota. Trat.: tratamiento; R: rodajas de 1,2 m; F_1,2: franjas de 1,2 m; F_2,4: franjas de 2,4 m; T: total; Mín: mínimo; Máx: máximo, $\bar{x}$: promedio. Elaboración propia, 2025.

Variables dasométricas asociadas a costos de control de arvenses

En el experimento en Banderas con la aplicación de herbicida en franjas de 1,2 m y franjas de 2,4 m se observó un crecimiento adecuado de los árboles con menores costos de inversión en el manejo de plantas arvenses, representando una disminución del 62 y 45 % respectivamente, con respecto a la aplicación total de herbicida. Paralelamente, al utilizar estos tratamientos hubo una disminución de descarga de herbicida en el suelo del 68 y 52 % en el año tres en comparación a la aplicación total.

Por su parte, en San Cristóbal se obtuvieron valores similares en las variables dasométricas de altura y volumen en los tratamientos de aplicación en área total y franjas de 2,4 m a los tres años. Al considerar los costos totales (sin contabilizar el manejo manual de las arvenses) se obtuvo un ahorro del 24 % al aplicar herbicida en franjas de 2,4 m con respecto a una aplicación del área total, lo que también representó una disminución del 25 % en la descarga de herbicida por hectárea.

Reducir el uso de herbicidas sintéticos permite una disminución en la contaminación del agua, se protege el suelo ante la radiación solar y la erosión (López *et al.*, 2018; Orozco-Bundis, 2006; Pozo-Lira *et al.*, 2016). Así mismo, esta práctica mejora las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo como: penetrabilidad del agua, estructura, densidad aparente, temperatura, capacidad de intercambio catiónico (CICE), pH, microorganismos fundamentales para mantener e incrementar la fertilidad y con ello la disponibilidad de nutrientes (N, P, K, entre otros) (Canales y Carrillo, 2018; Capurro y Montico, 2020; Crespo-Álvarez, 2020; Fuentes-Molina *et al.*, 2023). Todo lo anterior, pudo repercutir positivamente en el crecimiento y desarrollo de *T. grandis* a los tres años en los tratamientos de aplicación en franjas.

Los costos totales, sin incluir el manejo manual de plantas arvenses, presentaron un incremento conforme aumentó el área de aplicación del herbicida (Tabla 7). Al incluir el costo de la eliminación manual de las arvenses se observó un balance en los costos debido a que los tratamientos que requirieron mayor gasto de aplicación de herbicida sintético fueron los que presentaron menor costo en el manejo manual. Con respecto a la aplicación total, las diferencias obtenidas en costos fueron del 0,3; 6,2 y 6,5 % más para rodajas, franjas de 1,2 m y franjas de 2,4 m, respectivamente.

Tabla 7

Costos totales (US\$) por hectárea asociados al manejo de arvenses en dos fincas productoras de T. grandis de tres años de edad en la Zona Norte de Costa Rica.

Experimento	Trat.	Mano de obra/ha	Producto/ha	Manejo manual/ha	Costo sin manejo manual/ha	Costo con manejo manual/ha
Banderas	R	\$5,22	\$5,12	\$0,00	\$10,35	\$10,35
	F_1,2	\$4,86	\$6,26	\$0,00	\$11,12	\$11,12
	F_2,4	\$6,84	\$9,39	\$0,00	\$16,23	\$16,23
	T	\$10,13	\$19,36	\$0,00	\$29,49	\$29,49
San Cristóbal	R	\$9,04	\$6,13	\$54,38	\$15,16	\$69,54
	F_1,2	\$10,31	\$12,26	\$50,99	\$22,57	\$73,57
	F_2,4	\$13,39	\$19,70	\$40,71	\$33,09	\$73,80
	T	\$16,94	\$26,27	\$26,10	\$43,20	\$69,30

Nota. Trat.: tratamiento; R: rodajas de 1,2 m; F_1,2: franjas de 1,2 m; F_2,4: franjas de 2,4 m; T: total.

Elaboración propia, 2025.

Para el manejo de arvenses en *T. grandis*, Guevara *et al.* (2020), registraron un costo total de \$52,3 en mano de obra al realizar tres aplicaciones de herbicida sintético en el área total, \$150 en materiales (equipo de aspersión, equipo de seguridad y herbicidas) y \$41,8 en dos controles manuales de arvenses. Los resultados recalculados para una aplicación (\$67,43) y a un control manual (\$20,9) fueron de \$88,33, los cuales son superiores a los observados en el presente estudio (\$71,55). No obstante, en el estudio citado se consideraron dentro del cálculo los costos de los equipos de aplicación, lo que pudo incrementar el costo con respecto al presente estudio.

Efecto en la población de grupos tróficos de nematodos

Las poblaciones de grupos tróficos de nematodos con mayor abundancia en los experimentos de Banderas y San Cristóbal fueron los fitoparásitos (80,3 y 54,7 %, respectivamente),

bacteriófagos (16,9 y 37,6 %), depredadores (1,8 y 4,2 %) y micófagos (1,1 y 3,5 %). Las densidades poblacionales de nematodos en un sistema varían en función de la disponibilidad de recursos alimenticios, la estrategia de reproducción y la resistencia a las perturbaciones del entorno (Melakeberhan *et al.*, 2021). Ante ello, se evidencia que en el sistema productivo de *T. grandis* existe una vegetación que promueve la presencia de microbiota, meso y macrofauna edáfica, que incluye la nematofauna.

Según los resultados de las poblaciones en cada localidad, San Cristóbal presentó los valores más favorables en cuanto a la distribución de los grupos tróficos. En esta localidad se observó una menor cantidad de nematodos fitoparásitos (54,7 %), en comparación con Banderas. Este grupo corresponde a los nematodos que ocasionan daño a los sistemas radicales de las plantas. Por el contrario, los grupos bacteriófagos, depredadores y micófagos, comúnmente conocidos como nematodos de vida libre (VL), contabilizaron las mayores poblaciones, respecto a los contabilizados en la localidad Banderas. Estos tres grupos corresponden a nematofauna benéfica y cumplen funciones ecosistémicas esenciales como fijación de carbono, mineralización de nutrientes y mejora general de la fertilidad del suelo (Pires *et al.*, 2023).

En el grupo de los fitoparásitos, los géneros de mayor relevancia en Banderas fueron *Helicotylenchus* (79,2 %), *Mesocriconema* (12,1 %) y *Tylenchus* (5,3 %), mientras que *Meloidogyne*, *Pratylenchus*, *Psilenchus* y *Xiphinema* representaron en conjunto un 2,4 %. Los géneros *Diphtherophora* (28 ind), *Ditylenchus* (1 ind) y *Gracilacus* (11 ind) se identificaron en la medición previa a la aplicación de herbicidas sintéticos, pero no se registraron en la medición posterior (Anexo 1). El género *Helicotylenchus* que fue el más abundante se alimenta de células corticales de las raíces de la planta huésped, y no se considera una plaga importante para este cultivo perenne

(Crow, 2022), por lo que su presencia no representa una amenaza para la sanidad como si lo puede ser para cultivos de importancia agrícola.

Para el experimento en San Cristóbal, los géneros *Mesocriconema* (40,4 %), *Tylenchus* (37,4 %), *Meloidogyne* (8,4 %) y *Helicotylenchus* (8 %) fueron los de mayor presencia, seguidos por *Pratylenchus* y *Xiphinema* (4,4 %). El género *Gracilacus* (9 ind) se encontró únicamente en la primera medición (previo a la aplicación de herbicida), mientras que *Psilenchus* (3 ind) y *Trichodorus* (4 ind) aparecieron posterior a la aplicación de herbicidas sintéticos (Anexo 2).

La diferencia de la aplicación previa y posterior de herbicida sintético en los grupos tróficos según tratamientos no mostró diferencias significativas ($p > 0,05$; Tabla 8). Se observó que el grupo trófico de los bacteriófagos presentó un aumento en Banderas (+13 ind) y una disminución en San Cristóbal (-26 ind). Por su parte, los fitoparásitos presentaron aumentos de entre +87 ind (aplicación total) y +191 ind (franjas de 1,2 m) en promedio para Banderas. En el experimento de San Cristóbal, para el mismo grupo trófico, el rango promedio fue de entre -4 ind en franja de 2,4 m y +44 ind en rodajas.

Tabla 8

Diferencia en el número de individuos de grupos tróficos de nematodos (en 100 g suelo a capacidad de campo) presentes previa y posteriormente a la aplicación de herbicidas sintéticos según tratamientos de área de aplicación.

Exp.	Grupo trófico	Bacteriófago			Depredador			Fitoparásito			Micófago		
	Trat.	Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx	Mín	$\bar{x}$	Máx
Banderas	R	-12	12±21 ^a	38	-6	-3±2 ^a	-1	47	142±85 ^a	251	-2	2±3 ^a	5
	F_1,2	-12	25±44 ^a	88	0	2±2 ^a	4	-167	191±243 ^a	359	-10	-5±7 ^a	5
	F_2,4	-73	-7±56 ^a	62	-7	3±9 ^a	15	49	101±60 ^a	181	-2	1±3 ^a	5
	T	-32	23±37 ^a	50	-2	3±5 ^a	10	-96	87±131 ^a	214	-3	4±5 ^a	9
	General	-73	13±39	88	-7	1±5	15	-167	130±130	359	-10	1±5	9
San Cristóbal	R	-95	-44±37 ^a	-11	-6	3±11 ^a	17	22	44±25 ^a	79	-2	5±6 ^a	11
	F_1,2	-52	-13±37 ^a	30	-48	-20±21 ^a	2	-43	30±57 ^a	79	-6	2±7 ^a	11
	F_2,4	-78	-36±45 ^a	9	-23	-7±12 ^a	3	-60	-4±61 ^a	82	-14	-2±10 ^a	9
	T	-35	-9±36 ^a	42	-8	-6±2 ^a	-3	9	41±35 ^a	91	-4	-2±2 ^a	0
	General	-95	-26±39	42	-48	-8±12	17	-60	28±44	91	-14	1±6	11

Nota. Trat.: tratamiento; R: rodajas de 1,2 m; F_1,2: franjas de 1,2 m; F_2,4: franjas de 2,4 m; T: total; Mín: mínimo; Máx: máximo, $\bar{x}$: promedio. Elaboración propia, 2025.

La aplicación de herbicidas de forma sostenida en el tiempo puede tener efectos persistentes en la nematofauna. En un estudio realizado por McQueen *et al.* (2024), concluyeron que después de cuatro años de utilizar glifosato para controlar arvenses de un pastizal en restauración, no hubo una recuperación de las comunidades de nematodos, lo que demuestra efectos negativos de largo plazo. En este estudio, se observó una afectación significativa en los grupos fungívoros, omnívoros/depredadores y los asociados a las raíces, mientras que los bacteriófagos lograron recuperarse e incrementarse en el corto plazo.

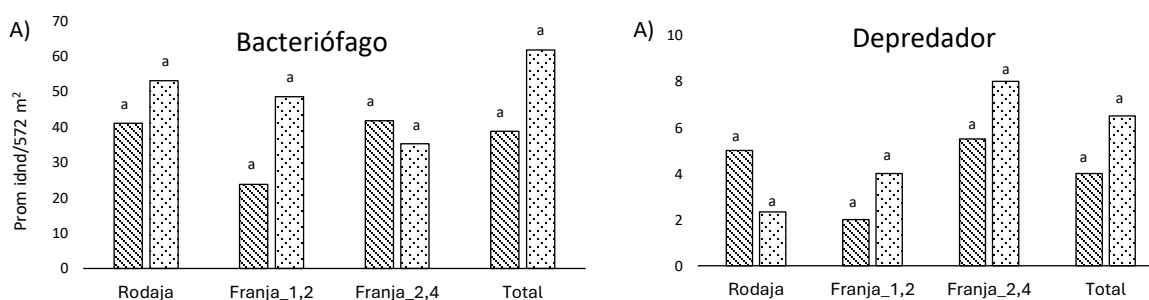
La dinámica observada en el grupo de nematodos bacteriófagos era lo esperado, ya que este grupo de nematodos se caracteriza por su alta progenie, lo que les permite repoblar rápidamente sitios disturbados debido a la disminución de competidores o al aumento de recursos tras la muerte de

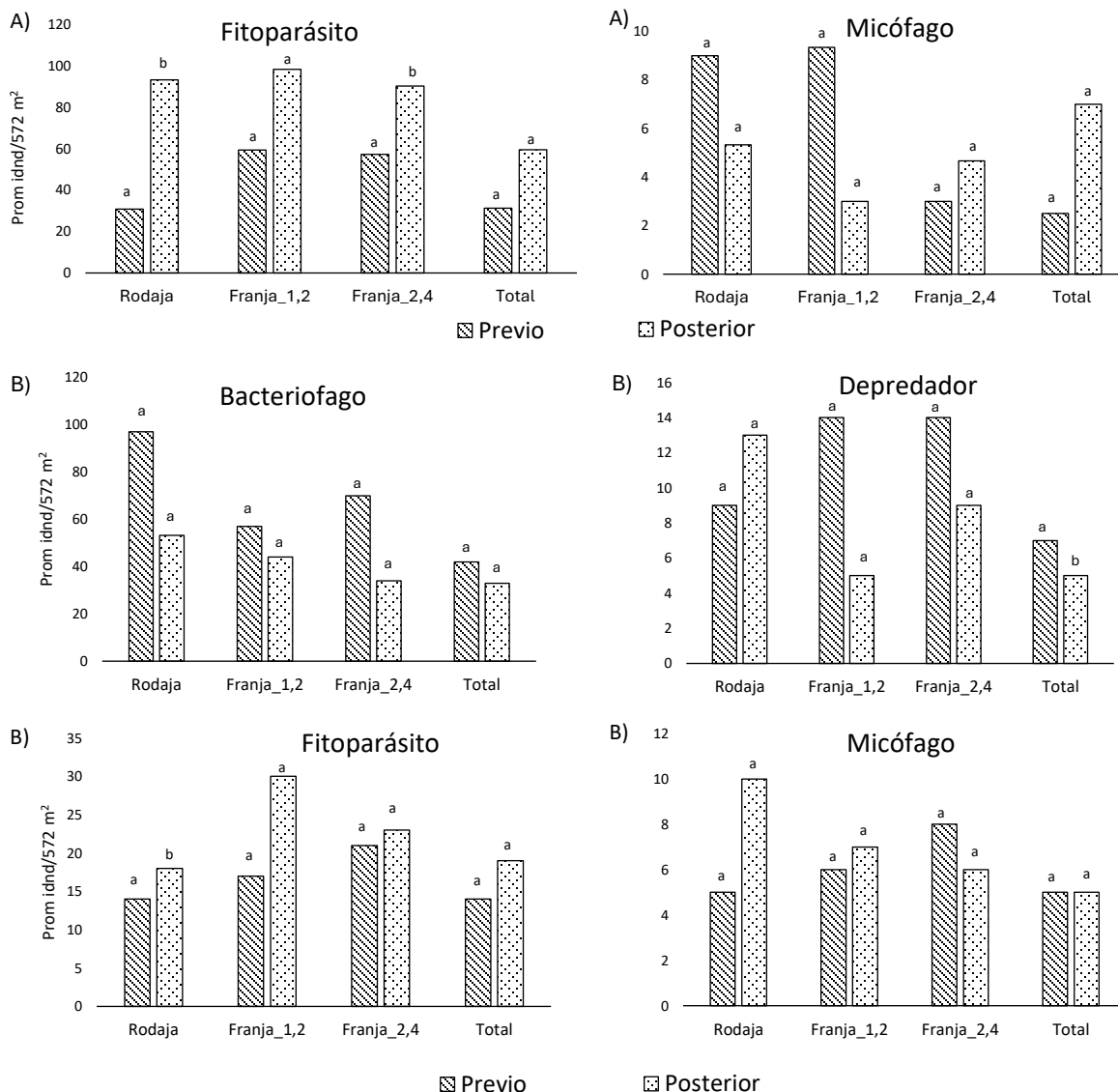
arvenses (Zhao *et al.*, 2013). En el suelo, la incorporación de MO de fácil descomposición permite la reproducción de bacterias, lo que promueve la presencia de dicho grupo trófico (Zamboni *et al.*, 2022). El fenómeno anterior fue observado en el experimento de Banderas.

El análisis del cambio de individuos por tratamiento según grupo trófico mostró que en la aplicación de rodajas ($p=0,044$) y franjas de 2,4 m ($p=0,043$) los fitoparásitos aumentaron en Banderas (Figura 1A), lo cual también se observó en las rodajas ($p=0,039$) del ensayo de San Cristóbal (Figura 1B). En este último experimento la aplicación total de herbicida presentó una reducción significativa ($p=0,012$) en los nematodos depredadores, los cuales se caracterizan por ser sensibles a las perturbaciones (Liang *et al.*, 2024). Los demás tratamientos mostraron aumentos o disminuciones no significativas en las poblaciones de nematodos, posterior a la aplicación de herbicidas sintéticos, con respecto a las comunidades presentes previamente a la aplicación.

Figura 1

Promedio de individuos presentes previo y posterior a la aplicación de herbicidas sintéticos según tratamiento y grupo trófico de nematodos evaluado en el ensayo de Banderas (A) y San Cristóbal (B), Costa Rica.





Nota. Distintas letras indican diferencias estadísticamente significativas al 95 % de confianza para cada tratamiento. Elaboración propia, 2025.

Conclusiones

Bajo las condiciones edafoclimáticas y de manejo silvicultural realizadas en el experimento de Banderas, se demostró que dejar un 70 % de cobertura vegetal mediante la aplicación de herbicidas en franjas de 1,2 m, promovió un adecuado crecimiento dasométrico de los árboles, así como menores costos en mano de obra, productos aplicados y descarga de herbicida sobre el suelo, en comparación con la aplicación de al área total.

En ambos experimentos, después de tres años de aplicar herbicida en franjas de 2,4 m, el crecimiento de *T. grandis* fue similar al observado en áreas de aplicación de herbicida en el área total, lo que permitió mantener una cobertura de arvenses del 40 % sin afectar el desarrollo de los árboles.

El manejo manual de arvenses mostró mayores costos en comparación al uso de herbicidas sintéticos; sin embargo, esta actividad es importante cuando la altura de la vegetación no permite la aplicación del agroquímico. Los costos de aplicación son mayores conforme aumenta el área de control, mientras que el costo del manejo manual aumenta conforme disminuye el área de control con químicos.

Las poblaciones de grupos tróficos de nematodos fitoparásitos, bacteriófagos, depredadores y micófagos no presentaron cambios significativos en función de los tratamientos de área de control con herbicidas sintéticos a los quince días después de la aplicación con respecto a las poblaciones registradas antes de la aplicación. Por tal motivo, se recomienda darle seguimiento a largo plazo en cuanto a la abundancia de estos microorganismos para determinar si existe afectación en el mediano y largo plazo.

Referencias

- Adams, P., Beadle, C., Mendham, N. y Smethurst, P. (2003). The impact of timing and duration of grass control on growth of a young *Eucalyptus globulus* Labill. plantation. *New Forests*, 26(2), 147-165. <https://doi.org/10.1023/A:1024490707175>
- Aguilar- Rodríguez, C., Sequeira-Guillen, A. y Peralta-Tercero, E. (2017). Factor de forma para la *Tectona grandis* L.F, empresa MLR-Forestal, Siuna, Costa Caribe Norte de Nicaragua. *Revista Ciencia e interculturalidad*, 21(2), 74-84. [10.5377/rci.v21i2.5602](https://doi.org/10.5377/rci.v21i2.5602)

Alvarado, A. y Mata, R. (2013). *Condiciones de sitio y la silvicultura de T. grandis*. En De Camino, R. y Morales, J. P. *Las plantaciones de T. grandis en América Latina: Mitos y realidades*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2854>

Alvarado-Prado, R., Salazar-Ugalde, M., Montero-Chaves, Y. y Fallas-Valencia, I. (2022). *Diagnóstico de personas afectadas por patologías, dolencias y accidentes vinculados al uso, exposición, lixiviación, dispersión, bioacumulación, consumo indirecto y directo de plaguicidas en Costa Rica y sus tratamientos*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

<https://impactoplaguicidas.cr/wp-content/uploads/2022/04/salud-2022-final-con-nota.pdf>

Álvarez, J., Venegas, R. y Pérez, C. (2004). Impacto de la duración y geometría del control de malezas en la productividad de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, en cinco ecosistemas del sur de Chile. Nota Técnica. *Bosque*, 25(2), 57-67. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002004000200006>

Aparicio, J. L., Maggio, A., y Fragueiro, L. (2018). *Control de malezas de Eucalyptus grandis: respuesta a diferentes anchos y periodos de control*. En XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Argentina.

Badilla-Valverde, Y. y Murillo-Gamboa, O. (2022). Selección clonal de *Tectona grandis* L. f. para el Pacífico Seco de Costa Rica. *Uniciencia*. 36(1), 1-15. <http://dx.doi.org/10.15359/ru.36-1.19>

Barrantes-Madrigal, K.; Murillo-Cruz, R.; Ávila-Arias, C E; Fonseca-González, W & Barquero Elizondo, Al. (2021). Distribución del volumen comercial por índice de sitio en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f en la zona norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(43), 9-17. <https://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v19i43.5804>

- Barrios, A., López, A.M., Nieto, V., Burgos, N., Yaya, M. y González, I. (2011). Efecto del control de malezas y fertilización sobre el crecimiento inicial de una plantación de *Gmelina arborea* Roxb. en el departamento del Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 14(1), 31-40.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392011000100004
- Blanco-Valdés, Y. (2016). El rol de las arvenses como componente en la biodiversidad de los agroecosistemas. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 34-56. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362016000400003&script=sci_arttext&tlng=pt
- Bourgeois, B., Munoz, F., Fried, G., Mahaut, L., Armengot, L., Denelle, P., Storkey, J., Gaba, S., & Violle, C. (2019). What makes a weed a weed? A large-scale evaluation of arable weeds through a functional lens. *American Journal of Botany*, 106(1), 90-100.
<https://doi.org/10.1002/ajb2.1213>
- Canales-Ramírez, R. A. y Carrillo-Hernández, R. A. (2018). *Efecto de tres coberturas vegetales (viva, muerta, semicompostada) sobre las condiciones físicas, biológicas del suelo y manejo de malezas en el cultivo de papaya en el sector CNRA, Campus Agropecuario UNAN-León Octubre 2017-Mayo 2018*. [Tesis de grado Universidad Nacional Autónoma de Managua].
<http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/7237/1/242023.pdf>
- Capurro, J. y Montico, S. (2020). Efecto de los cultivos de cobertura sobre las pérdidas de agua y suelo por erosión hídrica. *Cuadernos del Curiham*. 26(1), 41-47.
<https://cuadernosdelcuriham.unr.edu.ar/index.php/CURIHAM/article/view/147/116>
- Clément, C.; Pierret, A.; Maeght, J. L.; Hartmann, C.; Xayyathip, K.; Soulileuth, B.; Sounyafong, P.; Latsachack, K.; Thammahacksa, C. & Sengtaheuanghoung, O. (2019). Linking tree-rooting profiles

- to leaf phenology: a first attempt on *Tectona grandis* Linn F. *Trees*, 33(5), 1-14. [10.1007/s00468-019-01876-9](https://doi.org/10.1007/s00468-019-01876-9)
- Coll, L., Balandier, P. & Picon-Cochard, C. (2004). Morphological and physiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) seedlings to grass-induced belowground competition. *Tree Physiology*. 24(1), 45-54. [10.1093/treephys/24.1.45](https://doi.org/10.1093/treephys/24.1.45)
- Cortés Cortés, M. L., Murillo Cruz, R., Rojas Marín, J. F., Alice Guier, F., Carvajal Arroyo, D. A., Salazar Ruiz, A. G., Herrera Mejía, F., Pérez Poveda, P., Ramírez Muñoz, F. & Mora Campos, D. (2025). Almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo coberturas de pastos y plantaciones forestales jóvenes de *Tectona grandis* L.f y *Gmelina arborea* Robx. en la Región Huetar Norte, Costa Rica. *Revista Environment & Technology*, 6(1), 1-38. <https://doi.org/10.56205/ret.6-1.1>
- Cortes-Cortes, M.L., Murillo-Cruz, R.A., Ramírez-Muñoz, F., Rigg-Aguilar, P., Zalazar-Ruiz, A.G y Carvajal-Arroyo, D.A. (en prensa). Efecto de las coberturas *Crotalaria juncea* L., *Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth. y *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek sobre el control de plantas arvenses en una plantación clonal de *Tectona grandis* L. f. en Costa Rica.
- Corticeiro, S.; Maia, P.; Gonçalves, C.; Keizer, J.J. & Valente, C. (2023). How Weed Control Affects *Eucalyptus globulus* Labill. Productivity: Results from Two Long-Term Trials. *Forests*. 14(10), 1958. <https://doi.org/10.3390/f14101958>
- Crespo-Alvarez, S. I. (2020). *Problemas causados por el mal uso de los herbicidas en el manejo del cultivo Caña de Azúcar (Saccharum officinarum) en la zona Lorenzo de Garaicoa, Guayas*. [Tesis de grado Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/8352>

- Crow, W. T. (2022). *Spiral Nematode Helicotylenchus spp. (Nematoda: Tylenchida: Hoplolaimidae)*.
<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/IN973>
- Da Ponte Canova, E., y Salas, P. (2013). Control de malezas en plantaciones forestales con el uso de glyphosato y sulfato de amonio. *Investigación Agraria*, 11(1), 54–59.
<https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/41>
- De Camino, R. V; Alfaro, M. M. & Sage, L. F. M. (2002). *Teak (Tectona grandis) in Central America. Forest plantations working paper*. Forestry department.
- Fallas Zúñiga, J. L. (2014). *Respuesta a la fertilización de la teca (Tectona grandis L.f) con NPK en ultisoles de la zona norte de Costa Rica*. [Tesis de grado Instituto Tecnológico de Costa Rica].
- Fonseca González, William, Ávila Arias, Carlos, Murillo Cruz, Rafael y Rojas Vargas, Marilyn. (2021). Predicción de biomasa y carbono en plantaciones clonales de *Tectona grandis* L.f. *Colombia Forestal*, 24(1), 31-44. <https://doi.org/10.14483/2256201x.15961>
- Fuentes-Molina, N., Varela-Martinez, D. A. y Garcia-Solano, D. (2023). Cultivos de cobertura como alternativa sostenible: análisis de *Pueraria phaseoloides* en suelos tropicales. *Información Tecnológica*, 34(1), 47-58. <https://www.scielo.cl/pdf/infotec/v34n1/0718-0764-infotec-34-01-47.pdf>
- Garau M. A., Ghera, C. M., Lemcoff, J. H. & Baran, J. J. (2009). Weeds in *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* (F. Muell) establishment: effects of competition on sapling growth and survivorship. *New Forests*. 37, 251-264. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11056-008-9121-8>

- George, B. H. & Brennan, P. D. (2002). Herbicides are more cost-effective than alternative weed control methods for increasing early growth of *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus saligna*. *New Forests*. 24, 147–163. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021227913989>
- Gómez, M. y Reiche, C. (1998). *Costos de establecimiento y manejo de plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Costa Rica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Guevara, M. (2011). Productividad y costos de la chapea mecanizada en plantaciones jóvenes de *Acacia mangium* en la zona norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 8(20), 28-30. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/376>
- Guevara-Bonilla, M., Briceño-Elizondo, E., Esquivel-Segura, E. Arguedas & M. Arías-Aguilar, D. (2021). Cover crops as a weed control method and their effect on the initial growth of a *Tectona grandis* plantation. *Foresta*. 51(1), 184-191. [10.5380/rf.v51 i1. 67857](https://doi.org/10.5380/rf.v51i1.67857)
- Harper, G. J., Comeau, P. G. & Biring, B. S. (2005). A comparison of herbicide and mulch mat treatment for reducing grass, herb and shrub competition in the BC interior Douglas-Fir Zone-Ten-Year results. *WJAF*. 20(3). 167-176. [10.1093/wjaf/20.3.167](https://doi.org/10.1093/wjaf/20.3.167)
- Hernández-Rodríguez, P. (2017). *Efecto de diferentes métodos de control de arvenses en las propiedades del suelo, en plantaciones de teca, Tectona grandis (L.f.)*. [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9398/efecto_diferentes_metodos_control_arvenses_propiedades_sielo_plantaciones_teca_tectona_grandis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2024). Encuesta Nacional Agropecuaria 2023: Resultados generales de la actividad agrícola y forestal. San José, Costa Rica.

<https://admin.inec.cr/sites/default/files/2024-09/reagropecENAAGR%C3%8DCOLA2023-01.pdf.pdf>

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2014). *Suelos de Costa Rica: orden Ultisoles*. Ficha técnica 1.

<http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/07/00517-boletin-suelos-de-cr.pdf>

Jiménez-Velazco, J.J. (2015). *Evaluación de la intensidad y duración del control de malezas en una plantación comercial de eucalipto (Eucalyptus globulus Labill), de 0 a 1 año en la hacienda Santa María de Aglomerados Cotopaxi S.a, de la Parroquia Mulaló, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi*. [Tesis de licenciatura Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].

Kogan, M., y Figueroa, R. (1999). Interferencia producida por las malezas durante los dos primeros años en *Pinus radiata* D. Don. *Bosque*, 20(1), 57-64. <https://doi.org/10.4206/bosque.1999.v20n1-06>

Kremer, R. J., & Means, N. E. (2009). Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *European Journal of Agronomy*, 31(3), 153-161.

<https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.004>

Liang, S., Feng, C., Li, N., Sun, Z., Li, Y., Zhang, X., & Liang, W. (2024). Soil biological health assessment based on nematode communities under maize and peanut intercropping. *Ecological Processes*, 13(82), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s13717-024-00562-0>

López, F. M., Duval, M., Martínez, J. M. y Galantini, J. A. (2018). Propiedades físicas en suelos bajo siembra directa del sudoeste bonaerense. En Inbellone, P. A. y Alvarez, C. R. Compactaciones

naturales y antrópicas en suelos argentinos, 532-547.

https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/107364/CONICET_Digital_Nro.6b456860-9d0d-460d-8e47-2bbf2902cd5e_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Loría Maroto, J. (2017). *Fertilización con boro y análisis genéticos de los experimentos de teca (Tectona grandis L.f) de MLR Forestal, Siuna, RAAN, Nicaragua*. [Tesis de grado Instituto Tecnológico de Costa Rica].

Martínez, H. (2015). *Teca (Tectona grandis L. f.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”*. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal Forest Monitoring System for REDD+ Costa Rica.

McQueen, J. P.; Gendron, L. MS.; Solon, A. J.; Bueno de Mesquita, C. P.; Hufft, R. A.; Shackelford, N.; Suding, K. N.; Schmidt, S. K. & Porazi, D. L. (2024). Glyphosate-based restoration of a degraded grassland threatens soil health and the diversity of nematode communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 191(3), 1-14. [10.1016/j.soilbio.2024.109350](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109350)

Melakeberhan, H., Maung, Z., Lartey, I., Yildiz, S., Gronseth, J., Qi, J., Karuku, GN, Kimenju, JW, Kwoseh, C. y Adjei-Gyapong, T. (2021). Análisis de la red alimentaria del suelo basada en la comunidad de nematodos de los grupos de suelos ferralsol, litosol y nitosol en Ghana, Kenia y Malawi revela distintas degradaciones de la salud del suelo. *Diversity*, 13(3), 101.
<https://doi.org/10.3390/d13030101>

Meza-Picado, V., Alfaro-Jiménez, K., Bedoya-Arrieta, R., Romero-Mora, M., Valerio Madrigal, A. y Montenegro-Salas, P. (2019). *Reforestación comercial en Costa Rica, Regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Chorotega. Heredia, Costa Rica*.
https://www.fonafifo.go.cr/media/2976/reforestacion_comercial.pdf

Ministerio de Trabajo y Seguridad Social. (2025). *Salarios mínimos del sector privado*.

<https://www.mtss.go.cr/temas-laborales/salarios/lista-salarios.html>

Mott, C. M., Hofstetter, R. W., & Antoninka, A. J. (2021). *Post-harvest slash burning in coniferous forests in North America: A review of ecological impacts*. *Forest Ecology and Management*, 493, 119251.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119251>

Murillo, O., Wright, J., Monteuis, O. y Montenegro, F. (2013). *Mejoramiento genético de la teca en América Latina*. En De Camino, R. y Morales, J. P. *Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2854>

Orozco-Bundis, M. A. (2006). *Fomento de la agricultura sostenible mediante el establecimiento de un sistema de garantías de calidad en los procesos productivos y de comunicación a los consumidores. Aplicación a la agricultura mexicana*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://www.tdx.cat/handle/10803/6842#page=1>

Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2022). Fire-released seed dormancy — una síntesis global. *New Phytologist*, 233(5), 2085-2098. <https://doi.org/10.1111/nph.18063>

Pérez-Poveda, P. (2025). *Evaluación clonal temprana de Tectona grandis L.f creciendo bajo tres condiciones de suelo y manejo silvicultural en Nicoya, abangares y San Carlos*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Costa Rica].

Pires, D., Orlando, V., Collett, R. L., Moreira, D., Costa, S. R. & Inácio, M. L. (2023). Linking Nematode Communities and Soil Health under Climate Change. *Sustainability*, 15(15), 11747.

<https://doi.org/10.3390/su151511747>

- Pozo-Lira, A., Alvarado-Aguayo, A., Carrera-Mariduaña, B., Pilaloe-David, W. (2016). *Evaluación de distintas densidades de siembra de kudzu tropical (Pueraria phaseoloides) como alternativa de cobertura vegetal en plantaciones de cacao en la zona agrícola del cantón El Triunfo, provincia del Guayas*. [Tesis de grado, Universidad Agraria del Ecuador].
- Rodríguez Sánchez, G., Alvarado Briceño, S., Benavides Espinoza, J., Calvo Rojas, J., Carrizales Alvarado, A., Espinosa, U., Hernández Fallas, S., Ortega Meléndez, R. C., y Sancho Murillo, D. (2013). *Diagnóstico situacional del Cantón de San Carlos*. Universidad Nacional de Costa Rica.
<https://www.munisc.go.cr/documentos/Secciones/20/Diagn%C3%B3stico%20situacional%20del%20Cant%C3%B3n%20de%20San%20Carlos.pdf>
- Salas, A. (2019). *Estudio de la diversidad de nematodos asociados al sustrato como indicadores de la calidad del suelo en agroecosistemas*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata, Argentina]. <https://doi.org/10.35537/10915/74184>
- Salazar-Ruiz, A. G.; Carvajal-Ruiz, A.G.; Castillo-Mora, M.; Cortés-Cortes, M. L.; Ramírez-Muñoz, F. y Murillo-Cruz, R. (en prensa). Plantas arvenses presentes en plantaciones de Teca (*Tectona grandis* L.f.) y Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en cuatro regiones de Costa Rica.
- Zaller, J. G., Heigl, F., Ruess, L., & Grabmaier, A. (2014). Glyphosate herbicide affects belowground interactions between earthworms and symbiotic mycorrhizal fungi in a model ecosystem. *Scientific reports*, 4(1), 5634.
- Zamboni Machado, A. C.; Guidetti Zagatto, M. R.; Skora Neto, F.; Aleandro da Silva, S. & Zanão Júnior, L. A. (2022). Impact of crop management systems on soil nematode communities in South Brazil. *Sacientia Agricola*. 79 (1), 1-7. <http://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0088>

Zhao, J., Neher, D. A., Fu, S., Li, Z., & Wang, K. (2013). Non-target effects of herbicides on soil nematode assemblages: a meta-analysis. *Pest Management Science*, 69(6), 679–684.

[doi:10.1002/ps.3505](https://doi.org/10.1002/ps.3505)

Zobiole, L. H. S., Kremer, R. J., & de Oliveira Jr, R. S. (2011). *Glyphosate interactions with physiological, microbiological, and nutritional parameters in glyphosate-resistant soybeans*. Nova Scientific Publishers, Inc.

Capítulo IV. Efecto de tres coberturas vivas (*Pueraria phaseoloides*, *Vigna radiata* y *Crotalaria juncea*) en la interfase planta-suelo de una plantación clonal de *Tectona grandis* L.f.

Resumen

[Introducción]: El uso de coberturas vivas para el manejo de plantas arvenses es una estrategia agroecológica que influye en las propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo. [Objetivo]: Este estudio evaluó el efecto de tres coberturas vivas en una plantación clonal de *Tectona grandis* en Pocosol, San Carlos, Costa Rica. Se analizaron tres aspectos del agroecosistema: supresión de arvenses, desarrollo de árboles clonales de *T. grandis* y propiedades fisicoquímicas del suelo. [Metodología]: Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se establecieron tres especies de cobertura: *Pueraria phaseoloides* (kudzú), *Crotalaria juncea* (crotalaria) y *Vigna radiata* (frijol mungo). El experimento se inició en 2021, y en 2024 se midieron las concentraciones de macro y micronutrientes, penetrabilidad, densidad aparente, y cromatografía de suelos, variables de crecimiento de árboles y cobertura de arvenses. [Resultados]: Se observó un aumento en C, materia orgánica, pH y saturación de Ca, junto con una disminución en saturación de acidez, P y Cu en todos los tratamientos sembrados con coberturas vivas. Los árboles que crecieron en áreas sembradas con *V. radiata* + *C. juncea* mostraron los mayores valores en altura y diámetro. [Conclusiones]: *P. phaseoloides* fue la única especie que se mantuvo en el sitio ejerciendo manejo de arvenses después de tres años, debido a su condición de ser perenne. Sin embargo, requiere ser sembrada a una densidad óptima y ser manejada adecuadamente en los primeros años debido a que es una especie trepadora, con potencial de llegar a la copa de los árboles, afectándolos negativamente.

Palabras clave: agroecología, agroforestería, dinámica de nutrientes, malezas, manejo de arvenses, sostenibilidad.

Abstract

[Introduction]: The use of live cover crops for weed management is an agroecological strategy that influences the physical, biological, and chemical properties of the soil. [Objective]: This study evaluated the effect of three live cover crops in a clonal *Tectona grandis* plantation in Pocosol, San Carlos, Costa Rica. Three aspects of the agroecosystem were analyzed: weed suppression, growth of clonal *T. grandis* trees, and soil physicochemical properties. [Methodology]: A randomized complete block design with four replications was used. Three cover crop species were established: *Pueraria phaseoloides* (kudzu), *Crotalaria juncea* (sunn hemp), and *Vigna radiata* (mung bean). The experiment began in 2021, and in 2024 the following variables were measured: macro- and micronutrient concentrations, soil penetration resistance, bulk density, soil chromatography, tree growth, and weed coverage. [Results]: An increase in C, organic matter, pH, and Ca saturation was observed, along with a decrease in acidity saturation, P, and Cu in all treatments with live cover crops. Trees grown in areas with *V. radiata* + *C. juncea* showed the highest values in height and diameter. [Conclusions]: *P. phaseoloides* was the only species that persisted on site, providing weed management after three years due to its perennial nature. However, it requires optimal sowing density and proper management during the early years, as it is a climbing species.

Keywords: agroecology, agroforestry, nutrient dynamics, weeds, weed management, sustainability.

Introducción

El uso de coberturas vivas es una práctica agroecológica ampliamente utilizada para el manejo de arvenses, la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo y el incremento de la biodiversidad (Kocira *et al.*, 2020; Osorio-Espinoza *et al.*, 2023; Pérez y Figueroa, 2021). Estos cultivos, al cubrir el suelo, reducen la erosión, aumentan el contenido de materia orgánica (MO), y favorecen la fijación de N en el caso de leguminosas (Caicedo y Figueroa Del Castillo, 2021; Delgado *et al.*, 2021; Yauri, 2019). Otros beneficios que las coberturas vivas ofrecen son la creación de condiciones más favorables para el crecimiento de los cultivos principales y la reducción del uso de agroquímicos, lo cual genera un impacto positivo en la salud de los trabajadores agrícolas (Alvarado-Prado *et al.*, 2022; Guzmán-Plazola *et al.*, 2016; López-Rojas, 2019).

El aspecto anterior es de especial importancia en Costa Rica, donde el uso de herbicidas sintéticos en cultivos agrícolas y forestales fue de 3,28 millones de kg de ingrediente activo (i.a.)/ha/año para el periodo 2012-2021, siendo uno de los consumos por área más altos en el mundo (Vargas-Castro, 2022). Por esta razón, la búsqueda de estrategias que reduzcan la carga química de los suelos es indispensable para la sostenibilidad de la producción agrícola y forestal. Los herbicidas químicos de mayor uso en el país han sido el glifosato (grupo ácido fosforoso), paraquat (bipiridilo), 2,4-D (hormonal) y diuron (urea) (Alvarado-Prado *et al.*, 2022), con ellos se han obtenido mejores rendimientos en cuanto a crecimiento de especies forestales, pero con un alto impacto ambiental (Cortés-Cortés *et al.*, (prensa). En plantaciones forestales el manejo de arvenses para el establecimiento del cultivo es indispensable, ya que de otro modo las arvenses no permiten que la plántula se establezca debido a la supresión ejercida por la arvense.

Diversas investigaciones han evaluado los efectos de coberturas vivas de especies como *Pueraria phaseoloides*, *Crotalaria juncea* y *Vigna radiata* en diferentes sistemas agrícolas y forestales de

Honduras y México. Los resultados de dichas investigaciones evidenciaron el potencial de estas especies para aumentar la biomasa seca sobre el suelo, enriquecer el contenido de C y mejorar los niveles de nutrientes del suelo, especialmente en regiones tropicales (Lok *et al.*, 2019; Zambrana, 2020; Zavala-Sierra *et al.*, 2018). Sin embargo, pocos estudios han abordado los efectos de coberturas vivas en plantaciones de *Tectona grandis*, especialmente en lo que respecta a su interacción con la dinámica del crecimiento arbóreo y el manejo de arvenses en sistemas de alta competencia (Cortés-Cortés *et al.*, (prensa); Guevara-Bonilla *et al.*, 2021).

Para la evaluación del efecto de las coberturas vivas sobre el suelo, se utiliza el análisis químico, biológico y físico de suelo que puede acompañarse con métodos cualitativos como la cromatografía radial de Pfeiffer. En esta investigación se evaluaron los efectos de tres coberturas vivas; *P. phaseoloides*, *C. juncea* y *V. radiata*, en una plantación de *T. grandis* clonal de tres años, momento en el que ya no se requiere de un manejo de arvenses, debido a que el cierre del dosel en la plantación impide la entrada de luz solar, necesaria para el desarrollo de las arvenses. Basado en lo anteriormente expuesto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de estas coberturas sobre el crecimiento de los árboles de *T. grandis*, la supresión de arvenses y la composición química (macronutrientes, micronutrientes, MO, C, N y pH) y física del suelo (densidad aparente, penetrabilidad y temperatura).

Metodología

Área de estudio

La investigación se desarrolló en una plantación forestal clonal de *T. grandis* ubicada en el distrito de Pocosol, cantón de San Carlos, provincia de Alajuela, Costa Rica, entre julio de 2021 y agosto de 2024. El sitio pertenece a la zona de vida de Holdridge de bosque húmedo tropical, el cual se caracteriza por presentar una temperatura entre 24 y 30 °C y una precipitación entre 2 000 y 4 000 mm anuales (Instituto de Desarrollo Rural de Costa Rica ([INDER], 2015). El suelo es del orden ultisol,

caracterizado por ser ácido ($\text{pH} < 7,0$) debido al alto contenido de aluminio extraíble, bajo en calcio, profundo, con presencia de arcillas (principalmente caolinita) y óxidos de hierro y aluminio (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA], 2014).

Establecimiento del ensayo y diseño experimental

En el 2021 se estableció un experimento con seis tratamientos (parcelas) repetidos en cuatro bloques completos al azar. Los tratamientos consistieron en la siembra de las especies *V. radiata* (frijol mungo), *C. juncea* (crotalaria) y *P. phaseoloides* (kudzú) de manera individual y en combinaciones (Tabla 9). La propuesta de evaluar combinaciones de *P. phaseoloides*, *V. radiata* y *C. juncea* como coberturas vivas se basó en su complementariedad: mientras *P. phaseoloides* y *V. radiata* cubren rápidamente el suelo y manejan las arvenses en etapas tempranas, *C. juncea* aporta biomasa aérea, mejora la estructura del suelo y contribuye a la fijación de N. Juntas, estas leguminosas ofrecen una cobertura eficaz, mejoran la fertilidad y protegen el suelo contra la erosión.

Tabla 9

Tratamientos y cantidad de semillas plantadas de cada una de las coberturas vivas.

Código	Tratamiento	Semillas Kg/ha	Semillas por hoyo
T1C	<i>Crotalaria juncea</i>	3,5	3
T2P	<i>Pueraria phaseoloides</i>	13,5	6
T3V	<i>Vigna radiata</i>	16	2
T4P+C*	<i>Pueraria phaseoloides</i> + <i>Crotalaria juncea</i>	0,3 + 0,74	6 + 3
T5V+C*	<i>Vigna radiata</i> + <i>Crotalaria juncea</i>	0,6 + 0,74	2 + 3
T	Testigo	-	-

Nota. *Tratamiento combinado de 4 filas de *P. phaseoloides* o *V. radiata* más 1 fila de *C. juncea*.

Elaboración propia, 2025.

Previamente, en cada parcela se sembraron 36 árboles de *T. grandis* clonal con una altura aproximada entre 10 y 15 cm (de 10 semanas de edad), a un distanciamiento de cuatro metros entre árboles y entre filas (576 m² por parcela); estos fueron llevados del Vivero-UNA La Amapola al campo.

Entre los árboles se sembraron cinco filas de las coberturas vivas señaladas, con ayuda de un espeque según tratamiento, con un distanciamiento entre filas de 50 cm y de 15 cm entre puntos de siembra, manteniendo una distancia con respecto al árbol de un metro. Se incorporó un testigo absoluto, donde se mantuvo la vegetación sin intervención (Tabla 9). En los tratamientos combinados de *V. radiata* con *C. juncea* y *P. phaseoloides* con *C. juncea*, se sembraron cuatro filas de *V. radiata* o *P. phaseoloides* y una fila al centro de *C. juncea*.

Manejo Silvicultural

Previo al establecimiento de los árboles y de la cobertura, se realizó un subsolado y 15 días después se aplicó herbicida sobre todo el terreno a una dosis de 0,712 kg i.a./ha de glifosato más 0,012 kg de metsulfuron-metil /ha. Durante la siembra de los árboles se aplicaron 50 g de cal dolomita y 80 g de fertilizante químico 10-30-10 (N-P-K).

A los 24 meses después de la siembra (mds) se realizó una nueva aplicación de los mismos herbicidas con las mismas dosis, pero en bandas, en todos los tratamientos, debido a la afectación de *P. phaseoloides* a los árboles.

Variables de respuesta

Se recolectó, durante el tercer año de establecimiento del experimento (agosto de 2024), información sobre características dasométricas, supresión de arvenses (porcentaje de cobertura) y las propiedades fisicoquímicas del suelo. Para evaluar el crecimiento dasométrico, se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP) utilizando una cinta diamétrica, y la altura total de los árboles con un clinómetro digital Suunto. Estas mediciones se realizaron en los 16 árboles ubicados en el centro de cada parcela (4 repeticiones), para un total de 64 árboles por tratamiento. Los árboles en los bordes no fueron medidos con el fin de minimizar la influencia entre tratamientos debido a su proximidad.

Para determinar la supresión de arvenses, se evaluó el porcentaje de cobertura. Para esto se utilizaron 16 marcos de 50 cm × 50 cm (0,25 m²) por tratamiento. Las evaluaciones incluyeron la medición de la cobertura total, la cobertura específica de *V. radiata*, *P. phaseoloides* y *C. juncea*, además de la cobertura de arvenses de hoja ancha y angosta. Para determinar las propiedades fisicoquímicas se realizó un muestreo compuesto de suelo, con 4 submuestras por tratamiento tomadas a 5 cm de profundidad, en julio de 2022 (un año después de establecida la plantación) y en julio de 2024. En total se tomaron 96 submuestras por tratamiento para obtener un total de 24 muestras, que fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Foliaves del Instituto de Investigación y Servicios Forestales (LASAF) de la Universidad Nacional, Costa Rica. Los parámetros químicos analizados fueron las concentraciones de P, Ca, K, Mg, Mn, Cu, Zn, acidez, Fe, pH, el porcentaje de MO, N y C.

Adicionalmente, en 2024, se realizó un muestreo de densidad aparente, temperatura de suelo y penetrabilidad. La densidad aparente fue determinada mediante el método del volumen conocido utilizando cilindros colocado en la superficie del suelo (Almeida, 2019). Los cilindros fueron trasladados al LASAF y colocados en horno a 105 °C hasta alcanzar un peso constante, luego se determinó el volumen de cada uno midiendo el diámetro y la altura interna con un pie de rey.

La temperatura fue determinada con un termómetro de suelos marca Weksler y la resistencia a la penetración con un penetrómetro marca Eijkelkamp con la punta de 5 cm². La medición de penetrabilidad se realizó en 6 puntos de muestreo por parcela.

Con el propósito de identificar la calidad biológica, química y estructural del suelo, se realizó un análisis cualitativo por cromatografía de suelos (Pfeiffer), un cromatograma por cada tratamiento, a los tres años de establecido el experimento. El análisis se realizó en la Estación Experimental Los Juncos, en Vázquez de Coronado, utilizando el procedimiento descrito por Restrepo y Pinheiro (2015).

Procesamiento de la información

Para las mediciones dasométricas, también se calculó el incremento medio anual (IMA) y el volumen total por ha, utilizando un factor de forma de 0,55 (Aguilar, 2017). Los datos de cobertura se transformaron mediante el arcoseno de los valores originales para cumplir con los supuestos estadísticos. Para las propiedades edáficas, se calculó el valor promedio de cada tratamiento y se determinó la variación entre los resultados obtenidos en 2022 y 2024. En el caso de variables como penetrabilidad, densidad aparente y temperatura del suelo, el análisis comparativo se realizó únicamente para los datos recolectados en 2024.

Para el análisis de cromatografía de suelos, se utilizó la metodología descrita por Gallardo, 2001; Medina *et al.*, 2018, Restrepo y Pinheiro, 2015. Además, se realizó una medición con un pie de Rey de cada zona del cromatograma: zona externa (zona enzimática), zona intermedia (zona de MO), zona interna (zona mineral) y zona central.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) y pruebas de comparación de medias, empleando la prueba de Tukey para datos paramétricos y la prueba de Kruskal-Wallis para datos no paramétricos, utilizando el software R-Studio con un nivel de significancia del 5 %. Las variables analizadas incluyeron las características dasométricas, la cobertura vegetal y las propiedades fisicoquímicas del suelo.

Resultados y discusión

Supresión de arvenses

La permanencia de las tres coberturas vivas en el experimento fue variable debido a sus características de crecimiento. Tres años después de la siembra, únicamente se observó cobertura de *P. phaseoloides*. En contraste, *C. juncea* y *V. radiata* permanecieron en el terreno solo durante los primeros

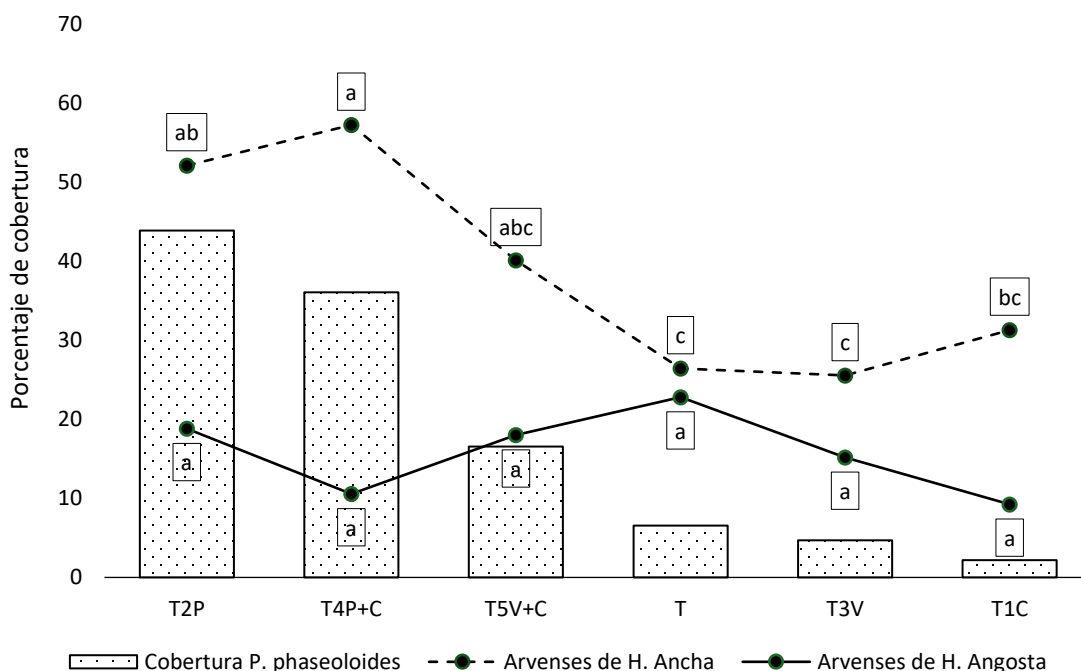
12 meses, por tratarse de especies anuales. De esta forma, la supresión de arvenses a largo plazo estuvo a cargo exclusivamente de *P. phaseoloides* mediante un efecto físico, mientras que *C. juncea* y *V. radiata* posiblemente contribuyeron a una supresión debido a su efecto alelopático, aunque esto no fue evaluado. Este efecto se manifiesta durante la descomposición en el suelo, inhibiendo la germinación, el crecimiento radicular y la elongación de las plantas arvenses (Al-Deliamy y Abdul-Ameer, 2023; Bundit *et al.*, 2021; Kocira *et al.*, 2020; Mennan *et al.*, 2020).

Al año tres, se observó en el área experimental un porcentaje de cobertura total promedio de 54,6 %, de la cual poco más de la mitad correspondió a arvenses de hoja ancha (55,2 %), un 24,4 % a arvenses de hoja angosta y un 20,4 % a la cobertura viva (únicamente *P. phaseoloides*). En plantaciones forestales de la región Huetar Norte de Costa Rica, existe una alta diversidad de especies de hoja ancha asociadas al cultivo, siendo *Spermacoce* sp., *Clidemia hirta*, *Mimosa pudica*, *Sida rhombifolia* y *Stygmaphyllum* sp., las de mayor abundancia, mientras que las arvenses de hoja angosta más abundantes son *Scleria pterota*, *Panicum maximum*, *Rottboellia cochinchinensis* e *Ischaemun* sp. (Carvajal, 2021).

Los tratamientos con menor cobertura vegetal total fueron el de *C. juncea* pura (T1C con 40,0 %) y el de *V. radiata* pura (T3V con un 40,9 %), mientras que el de mayor cobertura fue el *P. phaseoloides* pura (T2P con 70,9 %). El elevado valor de cobertura en *P. phaseoloides* se debe principalmente a que en este tratamiento se registró un menor crecimiento de los árboles, producto de la afectación de *P. phaseoloides*, lo que impidió el cierre completo del dosel y permitió el ingreso de luz al suelo. Diversos estudios han demostrado que una mayor entrada de luz al suelo favorece la germinación y crecimiento de arvenses, lo cual coincide con los resultados del presente estudio (Guevara-Bonilla *et al.*, 2021; Lazo y Ascencio, 2010).

Figura 2

Porcentaje de cobertura de suelo de una plantación de T. grandis, tres años después de establecidos los cultivos de cobertura, Pocosol, 2024.



Nota. T: Testigo, T1C: *Crotalaria juncea*, T2P: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T3V: *Vigna radiata*, T4P+C: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T5V+C: *Vigna radiata* en combinación con *Crotalaria juncea*. Elaboración propia, 2025.

En cuanto al manejo ejercido según el tipo de arvense, se registró un mayor porcentaje de especies de hoja ancha en los tratamientos con mayor presencia de *P. phaseoloides* (Figura 2). La presencia de arvense de hoja angosta en todos los tratamientos fue similar, sin diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$), aunque en el tratamiento de *P. phaseoloides* y en el testigo, los valores fueron más altos (20 %). En este último la cobertura viva fue en promedio de 43,9 %, sin embargo, a los 13 meses de establecida, la cobertura alcanzaba un promedio de 80 % y en algunos bloques fue de hasta el 100 % (Cortés-Cortés *et al.*, (prensa)).

Características químicas del suelo

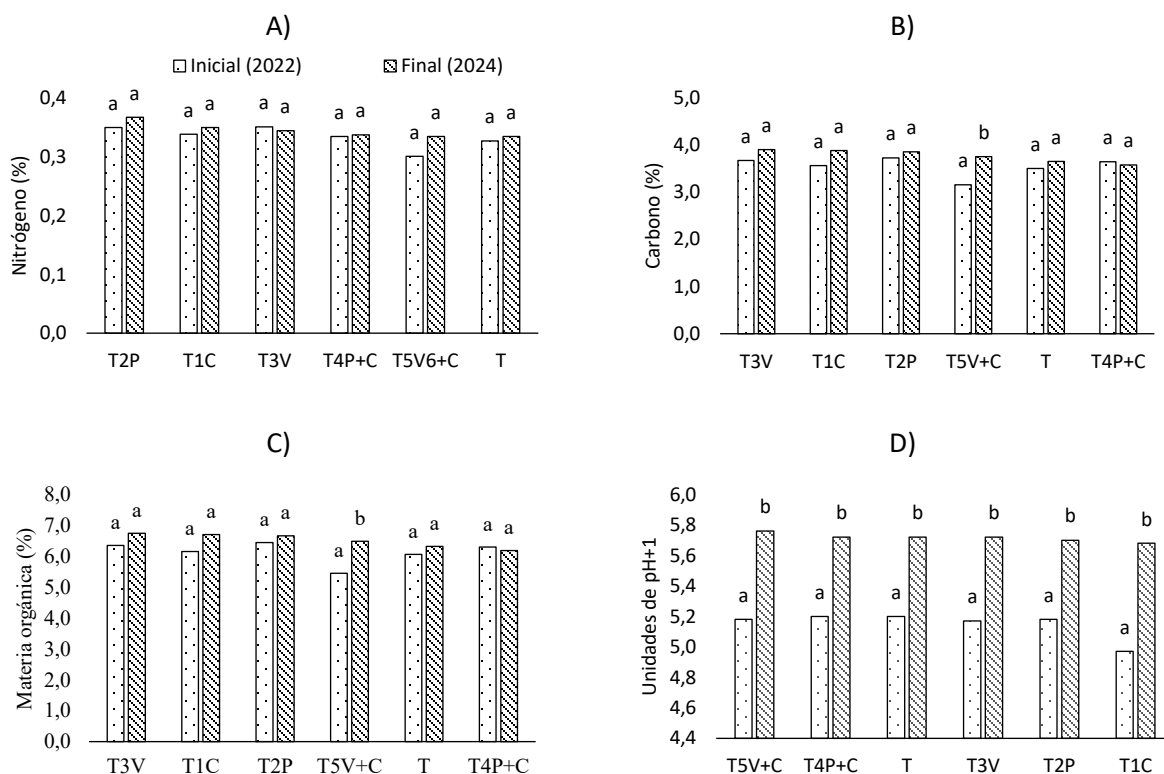
Los resultados del análisis químico del suelo evidenciaron que, a los tres años, todos los tratamientos se comportaron de manera similar y no existieron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre ellos. No obstante, al comparar los resultados químicos iniciales (2022) con respecto a los del 2024, hubo aumentos en la concentración de variables fundamentales para el óptimo desarrollo de *T. grandis*, así como una mejora generalizada del suelo. Esto indica que es probable que las coberturas vivas influyeran en la dinámica de nutrientes en el suelo durante el periodo evaluado (Lok *et al.*, 2019; Zambrana, 2020; Zavala-Sierra *et al.*, 2018).

Las variables que registraron un aumento significativo fueron el porcentaje de C, la MO, el pH, concentraciones de Ca y Zn, mientras que otras variables como la acidez, el P y el Cu, disminuyeron significativamente en algunos tratamientos ($p < 0,05$). Por su parte el N, la CIC, el Mg, K, Mn y Fe no registraron diferencias en el tiempo.

En el caso de la MO y el C, hubo un aumento del 19 % en el tratamiento que combinó la siembra de *V. radiata* con *C. juncea*, al comparar lo obtenido en 2022 con respecto al 2024 (Figura 3). En los tratamientos de *C. juncea* (T1C), *V. radiata* (T3V) y *P. phaseoloides* en combinación con *C. juncea* (T4P+C) también hubo incremento de entre un 3 y 9 % en estas variables, aunque no fueron estadísticamente significativas. En cuanto al N, el mayor contenido se registró en el tratamiento con *P. phaseoloides* con un aumento del 5 % entre el año uno y el tres de establecida la cobertura viva, lo cual es común al utilizar leguminosas (Caicedo y Figueroa Del Castillo, 2021; Delgado *et al.*, 2021; Yauri, 2019).

Figura 3

Efectos de las coberturas vivas sobre el porcentaje de (a) N, (b) C, (c) MO y (d) pH del suelo, Pocosol, 2024.



Nota. T: Testigo, T1C: *Crotalaria juncea*, T2P: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T3V: *Vigna radiata*, T4P+C: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T5V+C: *Vigna radiata* en combinación con *Crotalaria juncea*. Elaboración propia, 2025.

Los resultados de aumento de la MO y del C en el suelo, coinciden con investigaciones previas, como las realizadas en Honduras, donde se destacó el potencial de *V. radiata* y *C. juncea* para aportar biomasa e incrementar la MO del suelo (Zambrana, 2020). De manera similar, estudios en México y otras regiones tropicales han documentado que las leguminosas, incluidas especies como *V. radiata*, incrementaron la producción de biomasa, favorecieron la fijación de N y mejoraron los niveles de C en el

suelo (Lok *et al.*, 2019; Zavala-Sierra *et al.*, 2018). Aunque no siempre se cuantifica la magnitud de estos cambios, el aumento de 19 % registrado en este experimento en la cantidad de MO proporciona evidencia concreta del impacto positivo de estas especies en la calidad del suelo, con beneficios en los sistemas forestales tropicales sostenibles.

Además, el uso de coberturas vivas de leguminosas también ha demostrado tener un efecto positivo en la mejora del pH del suelo. En el presente estudio, el pH aumentó significativamente después de 3 años de establecidas las coberturas, cambiando de un promedio inicial general de 5,15 a 5,72; el mayor aumento se obtuvo en el tratamiento de *C. juncea* (14 %; Figura 3D). En un estudio sobre coberturas de leguminosas en cultivos de plátano (*Musa spp.*), se observó que su incorporación mejoró la fertilidad del suelo, incluyendo un aumento en el pH (Gutiérrez *et al.*, 2002).

De manera similar, investigaciones sobre el comportamiento de leguminosas como cobertura en plantaciones de palma aceitera, evidenciaron mejoras en la productividad y en las propiedades químicas del suelo, incluido el pH (Barrios-Maestre, 2011). Esto se debe, en parte, a la capacidad de las leguminosas para fijar N atmosférico y liberar cationes básicos durante su descomposición, neutralizando la acidez (Benites-Jump, 2020). Además, la exudación de compuestos orgánicos a través de las raíces desempeña un papel clave en la estimulación de la microbiología del suelo, al proveer fuentes de C fácilmente disponibles para microorganismos benéficos (Seitz *et al.*, 2022). Esta interacción favorece la actividad biológica y, con ello, mejora la fertilidad del suelo de forma natural.

Para obtener una alta productividad en plantaciones de *T. grandis* se requiere principalmente de altos contenidos de P disponible, Ca y Mg, así como valores de pH superiores a 5,5 (Alvarado, 2012; Zhou *et al.*, 2017). Además, según Alvarado y Fallas (2004), el IMA en altura en *T. grandis* está directamente relacionado con la saturación de acidez y de Ca en el suelo. En el presente estudio se observó que al utilizar la combinación de *V. radiata* con *C. juncea* la concentración de Ca aumentó un 24

%, mientras que la acidez disminuyó en un 72 % siendo estadísticamente significativa la diferencia ($p < 0,05$) entre los periodos de medición (Tabla 10). Además, se registraron aumentos de la saturación de Ca en los tratamientos de *V. radiata* en combinación con *C. juncea* (T5V+C) y el de *P. phaseoloides* (T2P). La mayor diferencia entre lo obtenido en 2022 y 2024 se registró al utilizar *P. phaseoloides* como cobertura viva, cambiando la saturación de Ca de 54 % en la primera medición a 67 % en la segunda. Este valor final es muy similar a lo reportado por Alvarado y Fallas (2004), quienes determinaron un mejor crecimiento en altura de *T. grandis* cuando el suelo contiene al menos un 68 % de saturación de Ca y 3 % o menos de saturación de acidez.

Tabla 10

Efectos de las coberturas vivas en la concentración de acidez, Ca, Mg, K y la capacidad de intercambio catiónico, Pocosol, 2024.

Tratamiento	Inicial (2022)					Final (2024)				
	Acidez	Ca	Mg	K	CICE	Acidez	Ca	Mg	K	CICE
Unidades					(cmol/L)					
T2P	0,25 ^a	4,39 ^a	1,99 ^a	0,17 ^a	6,79 ^a	0,28 ^a	5,05 ^a	2,00 ^a	0,18 ^a	7,51 ^a
T3V	0,23 ^a	4,17 ^a	1,70 ^a	0,23 ^a	6,32 ^a	0,32 ^a	4,68 ^a	2,08 ^a	0,25 ^a	7,27 ^a
T1C	0,35 ^a	3,93 ^a	1,80 ^a	0,19 ^a	6,26 ^a	0,28 ^a	4,55 ^a	1,85 ^a	0,28 ^a	6,95 ^a
T4P+C	0,75 ^a	4,36 ^a	1,81 ^a	0,30 ^a	7,23 ^a	0,28 ^a	4,60 ^a	1,75 ^a	0,25 ^a	6,87 ^a
T5V+C	0,90 ^a	3,54 ^a	1,59 ^a	0,16 ^a	6,19 ^a	0,25 ^b	4,40 ^b	1,90 ^a	0,21 ^a	6,76 ^a
T	0,80 ^a	3,75 ^a	1,84 ^a	0,15 ^a	7,15 ^a	0,32 ^a	4,28 ^a	1,88 ^a	0,16 ^a	6,63 ^a
Promedio	0,65	4,02	1,79	0,20	6,66	0,29	4,59	1,91	0,22	7,00

Nota. T: Testigo, T1C: *Crotalaria juncea*, T2P: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T3V: *Vigna radiata*, T4P+C: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T5V+C: *Vigna radiata* en combinación con *Crotalaria juncea*. Las letras en superíndice indican diferencias entre año 1 y 3; no se compararon entre tratamientos. Elaboración propia, 2025.

A pesar de que no hay información que sustente que el uso de coberturas vivas, como las leguminosas, influyan en la concentración de Ca, es posible que estas especies absorban Ca del subsuelo y lo acumulen en su biomasa. Al descomponerse, este Ca es liberado nuevamente al suelo, aumentando

su disponibilidad en los perfiles menos profundos. Además, con la fijación de N atmosférico, se mejora el balance nutricional del suelo y facilita la absorción de otros nutrientes, incluido el Ca (Barrios-Maestre, 2011; Martínez-Díaz, 2019). No obstante, se requiere de un estudio más específico para determinar la influencia de las leguminosas en la dinámica de absorción de Ca.

Otra posible razón del aumento del Ca en el tratamiento de *V. radiata* en combinación con *C. juncea* (T5V+C) es la reducción de la acidez y el aumento de los valores de pH. Según Alvarado (2012), en plantaciones de *T. grandis*, cuando los suelos presentan altos niveles de acidez, existen deficiencias de Ca, Mg y K por lo que no están disponibles para las plantas, afectando la nutrición natural que aporta el suelo.

En cuanto a micronutrientes, se obtuvieron aumentos de Zn al utilizar *P. phaseoloides* y reducciones significativas de P al utilizar esta misma especie en combinación con *C. juncea* (T4P+C) y *V. radiata* en combinación con *C. juncea* (T5V+C); además hubo una reducción en la concentración de Cu en todos los tratamientos. La reducción de Cu promedio en los tratamientos fue de 2,28 mg/l equivalentes a un 26 % siendo el testigo y el tratamiento con *V. radiata* en combinación con *C. juncea* los de mayor efecto. En relación con el P, hubo una reducción de su concentración en tres de los seis tratamientos de manera que, en los tratamientos de *P. phaseoloides*; *P. phaseoloides* en combinación con *C. juncea*; y *V. radiata* en combinación con *C. juncea* disminuyó el P disponible en el suelo mientras que, en los tratamientos de *C. juncea*, *V. radiata* y el testigo, aumentó (Tabla 11).

Tabla 11

Diferencia absoluta (mg/l) y relativa (%) en la concentración de P, Zn, Fe, Cu y Mn entre el año uno y el año tres en una plantación clonal de T. grandis, con diversos tratamientos de coberturas vivas Pocosol, 2024.

Tratamiento	P		Zn		Fe		Cu		Mn	
	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%	mg/l	%
T1C	0,45	29,15	0,54	23,30	23,58	21,60	-2,20	-24,44	10,42	28,28
T2P	-0,37	-19,75	0,70	33,33	20,52	20,53	-1,70	-21,25	19,69	53,14
T4P+C	-1,20	-54,55	0,49	23,22	3,21	2,44	-2,40	-28,24	18,59	52,85
T	0,18	15,00	0,54	23,04	29,93	23,97	-2,90	-31,87	2,93	7,64
T3V	0,09	5,32	0,91	41,43	-10,11	-6,89	-1,80	-21,18	9,62	26,80
T5V+C	-0,80	-38,10	0,71	33,19	24,58	20,37	-2,70	-29,35	-6,85	-11,68

Nota. T: Testigo, T1C: Crotalaria juncea, T2P: Pueraria phaseoloides en combinación con Crotalaria juncea, T3V: Vigna radiata, T4P+C: Pueraria phaseoloides en combinación con Crotalaria juncea, T5V+C: Vigna radiata en combinación con Crotalaria juncea. Elaboración propia, 2025.

Características físicas del suelo

Los resultados en Pocosol señalan a la combinación de *P. phaseoloides* con *C. juncea* como el tratamiento con mejores resultados (Tabla 12) en términos de menor densidad aparente y mayor penetrabilidad en los suelos. En cuanto a temperatura no hubo diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$). El tratamiento que combinó el uso de *P. phaseoloides* con *C. juncea* mostró una densidad aparente significativamente menor ($p < 0,05$) y una penetrabilidad más favorable en comparación con los demás tratamientos, resultados que coinciden con investigaciones previas sobre el uso de leguminosas como coberturas vivas en sistemas tropicales (Kocira *et al.*, 2020; Zambrana, 2020). La combinación de *P. phaseoloides* y *C. juncea* parece haber generado un efecto sinérgico al combinar la descomposición rápida de *C. juncea* con el aporte constante de MO de *P. phaseoloides*. Estas interacciones no solo mejoraron la estructura del suelo, sino que también pudieron haber incrementado

la actividad microbiana y la fijación de N, como se ha observado en suelos tropicales manejados con leguminosas (Barrios-Maestre, 2011).

Tabla 12

Características físicas de suelo sembrado con coberturas vivas en una plantación de clonal de tres años de T. grandis, Pocosol, 2024.

Tratamiento	Densidad aparente (g/cm ³)			Penetrabilidad (kg/cm ²)			Temperatura (°C)		
	Mín.	$\bar{x}$	Máx.	Mín.	$\bar{x}$	Máx.	Mín.	$\bar{x}$	Máx.
T4P+C	0,87	$0,92 \pm 0,03^a$	0,94	80,0	$89,7 \pm 7,6^a$	99,7	22,0	$23,0 \pm 1,2^a$	25,0
T5V+C	0,85	$0,92 \pm 0,04^a$	0,96	115,3	$132,0 \pm 13,2^b$	151,3	22,0	$22,8 \pm 0,8^a$	24,0
T	0,82	$0,92 \pm 0,07^a$	1,02	78,0	$97,5 \pm 19,9^{ab}$	124,0	22,0	$23,8 \pm 1,1^a$	25,0
T2P	0,81	$0,93 \pm 0,07^a$	0,98	92,0	$125,2 \pm 19,4^{ab}$	140,0	23,0	$24,5 \pm 1,1^a$	26,0
T1C	0,93	$0,96 \pm 0,02^a$	0,99	85,3	$115,2 \pm 17,6^{ab}$	130,7	23,0	$23,3 \pm 0,4^a$	24,0
T3V	0,91	$0,99 \pm 0,05^a$	1,04	107,3	$115,9 \pm 7,4^{ab}$	127,7	23,0	$24,3 \pm 0,8^a$	25,0
General	4,0	$9,8 \pm 1,9$	14,5	78,0	$112,2 \pm 21,2$	151,3	22,0	$23,6 \pm 1,2$	26,0

Nota. T: Testigo, T1C: *Crotalaria juncea*, T2P: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T3V: *Vigna radiata*, T4P+C: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T5V+C: *Vigna radiata* en combinación con *Crotalaria juncea*, Mín: mínimo, Máx: máximo, $\bar{x}$: promedio.
Elaboración propia, 2025.

La densidad aparente y la resistencia a la penetración son indicadores clave de la calidad física del suelo; valores bajos de densidad y resistencia indican suelos más porosos y bien estructurados que favorecen el crecimiento radicular. En contraste, valores altos reflejan compactación, lo que limita la infiltración de agua, la aireación y el desarrollo de las raíces, afectando negativamente la productividad.

Cromatografía de suelos

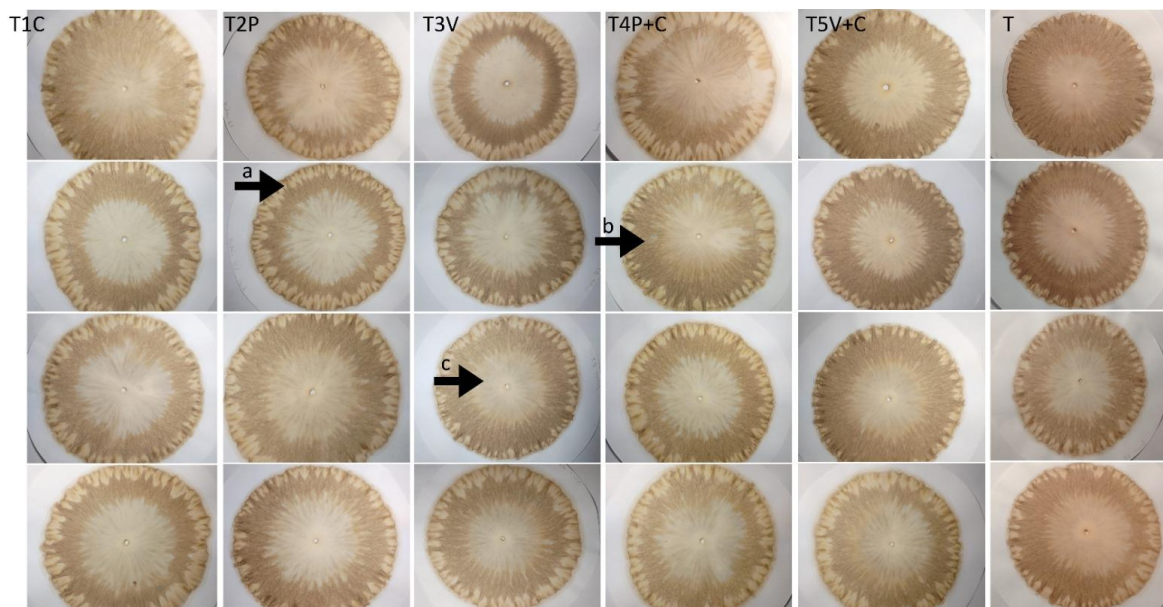
El análisis cromatográfico (cualitativo) sugiere que el suelo de todos los tratamientos presenta una estructura favorable, caracterizada por una adecuada porosidad y estabilidad de los agregados, sin indicios de compactación que pudiera afectar la infiltración de agua, el desarrollo radicular o la actividad microbiana (Restrepo y Pinheiro, 2015). En el centro de los cromatogramas, se observó un color crema

que se difumina gradualmente hacia las zonas circundantes, las cuales también muestran una integración armónica entre sí (Figura 4). En la mayoría de los cromatogramas (más del 90 %), la zona intermedia exhibió tonalidades de café claro que se mezclan con áreas ricas en MO o proteica, lo que evidencia una diversidad mineral asociada a una buena disponibilidad de MO para las plantas. Esta integración es resultado de una activa microbiología del suelo, reflejada en tonalidades doradas (Restrepo y Pinheiro, 2015).

Además, las radiaciones y ondulaciones observadas indican una actividad enzimática y proteica robusta, acorde con las características ideales para suelos que no han experimentado alteraciones drásticas en su composición. Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Arteaga-Barrueta *et al.* (2021) en cultivo de mango en Cuba con más de 40 años de no intervención antrópica y difieren con lo registrado en suelos con exceso de fertilizantes nitrogenados que se encuentran mineralizados, con la MO destruida y sin actividad biológica (Gallardo, 2001; Medina *et al.*, 2018; Restrepo y Pinheiro, 2015).

Figura 4

Cromatogramas del ensayo de coberturas vivas en plantaciones forestales, Pocosol, 2024.



Nota. T: Testigo, T1C: *Crotalaria juncea*, T2P: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T3V: *Vigna radiata*, T4P+C: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T5V+C: *Vigna radiata* en combinación con *Crotalaria juncea*. ^a Zona enzimática, ^b Zona de materia orgánica y ^c Zona mineral. Elaboración propia, 2025.

Este método cualitativo permite identificar cambios en la actividad enzimática, la acumulación de MO y la diversidad mineral del suelo, ofreciendo una visión integral de las condiciones edáficas (Restrepo y Pinheiro, 2015). Aplicaciones recientes de la cromatografía en sistemas agrícolas, incluyendo frutales, han demostrado su utilidad para comparar diferentes prácticas de manejo, proporcionando evidencia visual y cuantitativa de los impactos de estas en la salud del suelo (Arteaga-Barrueta *et al.*, 2021; Medina *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2024).

Una causa por la que las plantaciones forestales de *T. grandis* han mantenido condiciones favorables del suelo, es probablemente el uso de coberturas vivas, aunque también el manejo silvicultural histórico de este cultivo no ha sido tan intensivo y agresivo con el suelo. En condiciones

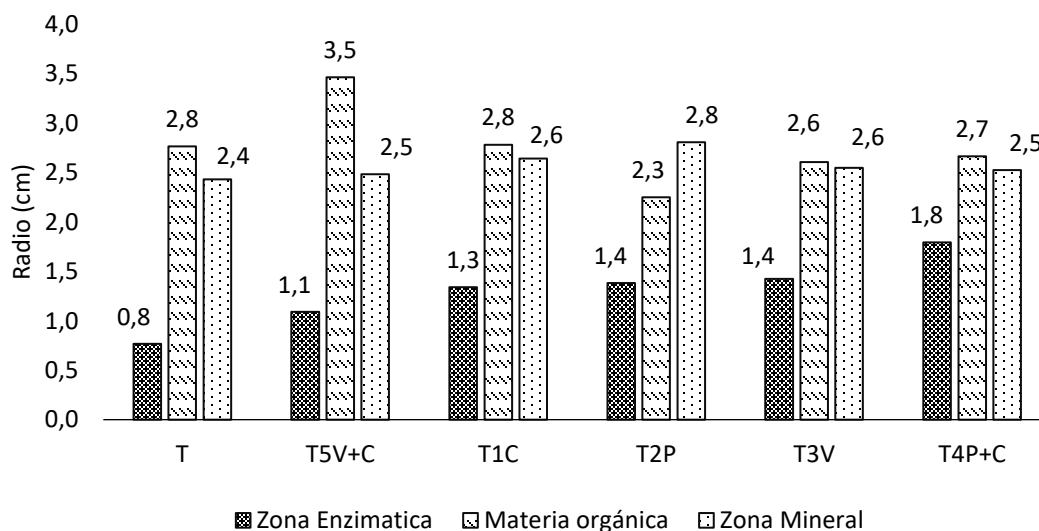
comerciales, el ciclo de producción de *T. grandis* es de entre 17 y 22 años, es común el uso de herbicidas durante los primeros tres años y la aplicación de pocas fertilizaciones nitrogenadas; además, de no existir factores que puedan generar compactación significativa del suelo (Herrera, 2024; Palma y Delgado, 2022).

A pesar de que en todos los tratamientos la cromatografía evidenció buenas condiciones en cuanto a las interacciones de la MO, los minerales y las enzimas, se registraron algunas diferencias en coloración y diámetros de cada zona del cromatograma, lo que sugiere influencia de las coberturas vivas sobre el suelo. En el tratamiento testigo, tres de los cuatro cromatogramas presentaron una coloración de la zona mineral más oscura con respecto a los demás tratamientos, lo que indica la existencia de un proceso de descomposición un poco más lento, donde comienza a prevalecer la mineralización (Arteaga-Barrueta *et al.*, 2021; Restrepo y Pinheiro, 2015).

En cuanto a los radios de los cromatogramas, en el testigo se registró la menor longitud (0,8 cm) de zona enzimática mientras que en suelo de los tratamientos con *P. phaseoloides* y *V. radiata* la longitud del radio fue mayor (1,8 cm). En la zona de MO el T5V+C fue el de mayor radio, mientras que la zona mineral fue mayor en el tratamiento con *P. phaseoloides* (Figura 5). Estas diferencias entre tratamientos no fueron significativas, pero señalan la influencia de las coberturas en la integración de la MO, la zona enzimática y mineral del suelo en los primeros tres años.

Figura 5

Mediciones del radio promedio por zona de los cromatogramas según tratamiento de cobertura viva, a los 3 años Pocosol, 2024.



Nota. T: Testigo, T1C: *Crotalaria juncea*, T2P: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T3V: *Vigna radiata*, T4P+C: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T5V+C: *Vigna radiata* en combinación con *Crotalaria juncea*. Nota. Elaboración propia, 2025.

Crecimiento dasométrico

El DAP y la altura total promedio fueron de 9,8 cm y 9,2 m respectivamente, siendo los tratamientos de *V. radiata* en combinación con *C. juncea* (T5V+C) y *C. juncea* pura (T1C) los de mayor crecimiento y los de *P. phaseoloides* (T4P+C y T2P) los de menor crecimiento. Con respecto al testigo, el uso de *V. radiata* + *C. juncea* (T5V+C) registró un 10 % más de altura y un 5 % más de DAP, mientras que el uso de *C. juncea* (T1C) generó un 9 % más de altura y un 4 % en DAP (Tabla 13). En volumen total por hectárea, *V. radiata* en combinación con *C. juncea* presentó en promedio 5,1 m³ más, en contraste con el testigo, sin diferencias estadísticas significativas ($p > 0,05$).

En comparación con investigaciones que emplearon herbicidas, los resultados del presente estudio con coberturas vivas fueron inferiores. Esto se debe a que, probablemente al eliminar el 100 % de la cobertura vegetal del suelo, *T. grandis* tiene acceso sin restricciones a los recursos nutricionales disponibles. Así, al contrastar estos hallazgos con un estudio realizado en la misma zona y con el mismo material genético, se observó una diferencia de hasta un 10,8 % menos en el IMA en altura y un 9,8 % en el IMA del DAP (Cortés-Cortés *et al.*, (prensa)).

No obstante, la eliminación total de la cobertura vegetal puede incrementar significativamente la erosión, ya que el suelo queda expuesto al impacto directo de las gotas de lluvia y al efecto del viento, lo que desagrega sus partículas y facilita su arrastre (Heras-Heras *et al.*, 2024; Huerta-Olague *et al.*, 2018). Como consecuencia, se pierde la capa superior del suelo, rica en nutrientes y MO, reduciendo su fertilidad, capacidad de infiltración y retención de agua (Heras-Heras *et al.*, 2024). Además, la ausencia constante de cobertura agrava la degradación de la biodiversidad, ya que destruye hábitats naturales y afecta la macrofauna y microbiología del suelo (Castillo-Trejo, 2023).

Tabla 13

Características dasométricas de árboles de T. grandis de tres años en parcelas experimentales sembradas con coberturas vivas, Pocosol, 2024.

Tratamiento	Árboles	DAP (cm)			Altura total (m)			Volumen total (m ³ ha ⁻¹)		
		Mín.	$\bar{x}$	Máx.	Mín.	$\bar{x}$	Máx.	Mín.	$\bar{x}$	Máx.
T5V+C	60	4,5	10,3 ± 1,8 ^a	13,6	6,0	9,9 ± 1,4 ^a	12,8	19,3	28,1 ± 6,1 ^a	35,4
T1C	62	6,3	10,2 ± 1,5 ^a	12,8	6,0	9,8 ± 1,4 ^a	12,1	21,6	27,8 ± 3,9 ^a	31,5
T3V	60	5,2	9,9 ± 1,6 ^{ab}	13,4	4,5	9,8 ± 1,5 ^a	12,1	17,5	25,9 ± 5,1 ^a	31,2
T	58	4,0	9,8 ± 1,8 ^{ab}	13,8	2,7	8,9 ± 1,8 ^b	12,1	15,6	23,0 ± 6,5 ^a	31,5
T4P+C	56	5,1	9,5 ± 1,9 ^{bc}	14,0	4,3	8,7 ± 1,7 ^{bc}	12,3	9,1	20,4 ± 8,7 ^a	33,1
T2P	59	4,4	8,9 ± 2,0 ^c	14,5	4,6	8,0 ± 1,9 ^c	12,3	7,4	18,1 ± 10,4 ^a	33,5
General	355	4,0	9,8 ± 1,9	14,5	2,7	9,2 ± 1,8	12,8	7,4	23,9 ± 8,0	35,1

Nota. T: Testigo, T1C: *Crotalaria juncea*, T2P: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria*

juncea, T3V: *Vigna radiata*, T4P+C: *Pueraria phaseoloides* en combinación con *Crotalaria juncea*, T5V+C:

Vigna radiata en combinación con *Crotalaria juncea*, Mín.= mínimo, Máx.= máximo, ha= hectárea, $\bar{x}$ = promedio. *el valor de n en el ANDEVA fue de 4. Elaboración propia, 2025.

Tres años después del inicio del experimento, *P. phaseoloides*, empleada en los tratamientos en combinación con *C. juncea* (T4P+C) y pura (T2P), se consolidó como la única especie activa en el manejo de arvenses en el sitio, lo cual se atribuye a su carácter perenne, a diferencia de las especies anuales *C. juncea* y *V. radiata*. No obstante, los tratamientos con *P. phaseoloides* presentaron un crecimiento de los árboles significativamente inferior al testigo y a los demás tratamientos ($p < 0,05$). Con respecto al tratamiento con mejor altura (*V. radiata* con *C. juncea*), el *P. phaseoloides* registró un 19,2 % menos de altura y 13,6 % de DAP; en contraste con el testigo la diferencia fue menor, ya que se obtuvo un 10,0 % menos en altura y un 8,7 % en DAP.

Conclusiones

El uso de coberturas vivas de *V. radiata* en combinación con *C. juncea* demostró ser una estrategia eficaz para mejorar las características físicoquímicas del suelo, aumentando el porcentaje de materia orgánica, C, concentración de Ca, y disminuyendo significativamente su acidez. Por otro lado, se evidenció que *P. phaseoloides* propició aumentos en los contenidos de N del suelo, disminuyó la resistencia a la penetrabilidad y aumentó de la saturación de Ca, promoviendo valores óptimos para el crecimiento de *T. grandis*.

Las combinaciones con especies anuales (*V. radiata* con *C. juncea*) favorecieron el desarrollo en altura y DAP respecto al testigo, mientras que los tratamientos con *P. phaseoloides* redujeron significativamente el crecimiento. Esto sugiere que, aunque las coberturas perennes aseguran persistencia en el control de arvenses, pueden competir de forma más intensa con los árboles por recursos, limitando su desempeño, por lo que se recomienda la determinación de una densidad de siembra óptima de la cobertura viva.

Los cromatogramas mostraron una integración armónica de los componentes del suelo; materia orgánica, la zona enzimática y los minerales, reflejando una microbiología activa y una buena disponibilidad de nutrientes. A pesar de las variaciones en la coloración y los diámetros de las zonas, las diferencias entre tratamientos no fueron significativas, aunque evidencian la influencia positiva de las coberturas vivas en la dinámica del suelo.

Referencias

- Aguilar- Rodríguez, C., Sequeira-Guillen, A. y Peralta-Tercero, E. (2017). Factor de forma para la *Tectona grandis* L.F, empresa MLR-Forestal, Siuna, Costa Caribe Norte de Nicaragua. *Revista Ciencia e interculturalidad*, 21(2), 74-84. [10.5377/rci.v21i2.5602](https://doi.org/10.5377/rci.v21i2.5602)
- Al-Deliamey, A. O. A., & Abdul-Ameer, M. A. (2023, July). *The allelopathic effect of root exudates of mungbean and maize plants affected by metabolic, fertilizer and mechanical stress factors on some indicators of germination of cowpea seeds*. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1213(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1213/1/012026>
- Almeida, E. M., Campelo-Júnior, J. H. y Finger, Z. (2010). Determinação do estoque de carbono em teca (*Tectona grandis* L. f.) em diferentes idades. *Ciência Florestal Santa Maria*, 20(4), 559-56.
- Alvarado, A. y Fallas J.L. (2004) La saturación de acidez y el encalado sobre el crecimiento de la teca (*Tectona grandis* Lf) en suelos ácidos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28, 81–87.
- Alvarado, A. y Raigosa, J. (2012). Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. *Agronomía Costarricense*, 36(1).
- Alvarado-Prado, R., Salazar-Ugalde, M., Montero-Chaves, Y. y Fallas-Valencia, I. (2022). *Diagnóstico de personas afectadas por patologías, dolencias y accidentes vinculados al uso, exposición,*

lixiviación, dispersión, bioacumulación, consumo indirecto y directo de plaguicidas en costa rica y sus tratamientos. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

<https://impactoplaguicidas.cr/wp-content/uploads/2022/04/salud-2022-final-con-nota.pdf>

- Arteaga-Barrueta, M., Yesca-Jarquín, C., Álvarez-González, A., Otaño-Corona, L., Pino-Roque, J. A., Evangelista, Alejandro. C. & Reyes-Rodríguez, R. (2021). Radial chromatography for systemic monitoring of soils with different management. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(3).
- Barrios-Maestre, R., Fariñas, J., Silva-Acuña, R., y Sanabria, D. (2011). Comportamiento de cinco especies de leguminosas como cobertura viva en palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela. *Idesia (Arica)*, 29(2), 29-37. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000200004>
- Benites-Jump, J.R. (2020). Las leguminosas en la alimentación y en la fertilidad de los suelos. *LEISA Revista de Agroecología*, 36(4), 10-12. https://leisa-al.org/web/revista/volumen-36-numero-04/las-leguminosas-en-la-alimentacion-y-en-la-fertilidad-de-los-suelos/?utm_source=chatgpt.com
- Bundit, A., Ostlie, M., & Prom-U-Thai, C. (2021). Sunn hemp (*Crotalaria juncea*) weed suppression and allelopathy at different timings. *Biocontrol Science and Technology*, 31(7), 694-704. <https://doi.org/10.1080/09583157.2021.1881446>
- Castillo-Trejo, Eric Yanuario, Flota-Bañuelos, Carolina, Alcudia-Pérez, Julia, Fraire-Cordero, Silvia, Rosales-Martínez, Verónica, y Quej-Chí, Víctor Hugo. (2023). Macrofauna edáfica y calidad del suelo en agroecosistemas agrícolas y pecuarios de Campeche. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 14(3), 413-424. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3108>

- Cortés-Cortés, M.L. (en prensa). Reducción del área de aplicación de herbicida como estrategia agroecológica para el manejo de plantas competidoras en plantaciones clonales de *Tectona grandis*.
- Cortés-Cortés, M.L., Murillo-Cruz, R.A., Ramírez-Muñoz, F., Rigg-Aguilar, P., Zalasár-Ruíz, A.G y Carvajal-Arroyo, D.A. (en prensa). Efecto de las coberturas *Crotalaria juncea* L., *Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth. y *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek sobre el control de plantas arvenses en una plantación clonal de *Tectona grandis* L. f. en Costa Rica.
- Delgado, J. A., Mosquera, V. H. B., Alwang, J. R., Villacis-Aveiga, A., Ayala, Y. E. C., Neer, D. & López, L. O. E. (2021). Potential use of cover crops for soil and water conservation, nutrient management, and climate change adaptation across the tropics. *Advances in Agronomy*, 165, 175-247.
<https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.09.003>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2004). *The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustainable agriculture*.
<https://www.fao.org/4/a0100e/a0100e.pdf>
- Gallardo, L. J. (2001). *Mineralización y humificación de la materia orgánica del suelo: consecuencias sobre la contaminación*. Medellín, Colombia. En: X Congreso de la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo.
- Guevara-Bonilla, M., Briceño-Elizondo, E., Esquivel-Segura, E. Arguedas & M. Arías-Aguilar, D. (2021). Cover crops as a weed control method and their effect on the initial growth of a *Tectona grandis* plantation. *Foresta*. 51(1), 184-191. [10.5380/rf.v51.i1.67857](https://doi.org/10.5380/rf.v51.i1.67857)

Gutiérrez, I. R., Pérez, G., Benega, R. y Gómez, L. (2002). Coberturas vivas de leguminosas en el plátano (Musa sp.) FHIA 03. *Cultivos Tropicales*, 2002, 23(3), 11-17.

<https://www.redalyc.org/pdf/1932/193218120002.pdf>

Guzmán-Plazola, P., Guevara-Gutiérrez, R.D., Olguín-López, J. L. y Mancilla-Villa, O. R. (2016). Perspectiva campesina, intoxicaciones por plaguicidas y uso de agroquímicos. *Idesia*, 34(3), 69-80.

<https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v34n3/art09.pdf>

Heras-Heras, M. C., Moreno-López, J.A., Quevedo-Amay, D.V. y Cuichan-Paucar, S. H. (2024). Pérdida de cobertura vegetal y los cambios de uso del suelo en la Amazonia ecuatoriana. Agroecología Global. *Revista Electrónica de Ciencias del Agro y Mar*, 6(10), 89-

104. <https://doi.org/10.35381/a.g.v6i10.3579>

Hernández-Rodríguez, P. (2017). *Efecto De Diferentes Métodos De Control De Arvenses En Las Propiedades Del Suelo, En Plantaciones De Teca, Tectona Grandis (L.F.)*. [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

Huerta-Olague, J.J, Oropeza Mota, J.L., Guevara Gutiérrez, R. D., Ríos Berber, J.D., Martínez Menes, M.R., Barreto García, O.A., Olguín López, J.L. y Mancilla Villa, O.R. (2018). Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo. *Idesia*, 36(2), 153-

162. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005000701>

Instituto de Desarrollo Rural. (2015). *Informe de Caracterización Básica: Territorio San Carlos-Peñas Blancas-Río Cuarto. Oficina Subregional de San Carlos. Dirección Huetar Norte, Costa Rica.*

<https://www.inder.go.cr/san-carlos-penas-blancas-río-cuarto/Caracterizacion-San-Carlos-Penas-Blancas-Rio-Cuarto.pdf>

Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2014). *Suelos de Costa*

Rica: orden Ultisoles. Ficha técnica 1.

<http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/07/00517-boletin-suelos-de-cr.pdf>

Kocira, A., Staniak, M., Tomaszewska, M., Kornas, R., Cymerman, J., Panasiewicz, K., & Lipińska, H.

(2020). Legume cover crops as one of the elements of strategic weed management and soil quality improvement. A review. *Agriculture*, 10(9), 394.

<https://doi.org/10.3390/agriculture10090394>

Lok, S., Torres, V. y Sarmiento, M. (2019). Efecto de las leguminosas en la dinámica edáfica en áreas ganaderas del occidente de Cuba. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 23(1), 57-77.

<https://www.redalyc.org/journal/837/83759628006/html/>

López-Rojas, M. (2019). *Evaluación de los efectos en la salud por el uso de plaguicidas en la agricultura de pequeños productores parcelarios del cantón de La Cruz, Guanacaste, Costa Rica*. [Tesis de grado, Universidad Técnica Nacional]. <https://repositorio.utn.ac.cr/handle/20.500.13077/337>

Martínez Díaz, G. (2019). Efecto de la maleza como cobertera en la fertilidad del suelo y rendimiento de nogal pecanero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(1), 123-

130. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1729>

Medina-Saavedra, T-, Arroyo-Figueroa, G., y Peña-Caballero, V. 2018. Cromatografía De Pfaiffer En El análisis de Suelos De Sistemas Productivos. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 9(3), 665-

673. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1223>

Mennan, H., Jabran, K., Zandstra, B. H., & Pala, F. (2020). Non-chemical weed management in vegetables by using cover crops: A review. *Agronomy*, 10(2), 257.

<https://doi.org/10.3390/agronomy10020257>

Osorio-Espinoza, H., Leyva-Galan, A., Toledo-Toledo, E. y Marroquin-Agreda, F. J. (2023). Influencia de las coberturas vivas y muertas sobre las arvenses, en un agroecosistema con rambutan

(*Nephelium lappaceum* L.), en Mexico. *Cultivos Tropicales*, 44(4), 1-7. <https://cu->

[id.com/2050/v44n4e05](https://cu-id.com/2050/v44n4e05)

Palma, L. A. y Delgado, A. (2022). *Producción y rentabilidad en una plantación de teca (Tectona grandis) en Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional, Costa Rica].

Pérez, P. y Figueroa, L. (2021). Evaluación de Canavalia ensiformis y Vigna radiata como abonos verdes, sobre la dinámica microbiana del suelo de la finca El Plan de Burras, en el municipio de El Espino, Boyacá, Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 17, 27-40. [10.18359/rfcb.5433](https://doi.org/10.18359/rfcb.5433)

Restrepo Rivera, J., & Pinheiro, S. (2015). *Cromatografía: Imágenes de vida y destrucción del suelo*. Permacultura América Latina.

Santos, HKS, Vagmakre, RG, Felix, SA de O., Morais, RG de, Oliveira, TS de, Duarte Junior, MA, Polese, V., Oliveira, IA de, & Freitas, L. de. (2024). Calidad del suelo bajo cultivo de hortalizas determinada por cromatografía Pfeiffer en agricultura familiar en Vale do Jamari-RO. *Cuaderno Pedagógico*, 21(7), 1-21. [10.54033/cadpedv21n7-210](https://doi.org/10.54033/cadpedv21n7-210)

Seitz, V.A., McGivern, B.B., Daly, R.A., Chaparro, J.M., Borton, M.A., Sheflin, A.M., Kresovich, S., Shields, L., Schipanski, M.E., Wrighton K.C. & Prenni, J.E. 2022. Variation in Root Exudate Composition

Influences Soil Microbiome Membership and Function. *Appl Environ Microbiol* 88(11), 226.

<https://doi.org/10.1128/aem.00226-22>

Washington State University (WSU). (2018). *Soil health in orchards*. Tree Fruit Research & Extension

Center. <https://treefruit.wsu.edu/orchard-management/soils-nutrition/soil-health-in-orchards/>

Yauri, C.J. (2019). *Uso De Tres Especies De Leguminosas Canavalia Ensiformes, Centrosema*

Macrocarpum, Pueraria Phaseoloides en la Recuperación De Suelos Degradados en el Distrito De

Luyando. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú].

Zambrano, E. (2020). Evaluación de cuatro leguminosas como cultivos de cobertura en Zamorano,

Honduras. [Tesis de licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana].

Zavala-Sierra, Daniela., Rodríguez-Ortiz, J., Jáuregui, A., Ruiz-Espinoza, F., Mancillas, R., Rodriguez, H., y

Delgado-Sánchez, P. (2018). Potencial de cinco especies de leguminosas como abonos verdes en

la zona altiplano de San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 9(20), 4323-

4330. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i20.1001>

Zhou, Z., Liu, S. & Liang, K. (2017). Growth and mineral nutrient analysis of teak (*Tectona grandis*) grown

on acidic soils in south China. *J. For Res.* 28, 503–511. [https://doi.org/10.1007/s11676-016-](https://doi.org/10.1007/s11676-016-0324-0)

[0324-0](https://doi.org/10.1007/s11676-016-0324-0)

Capítulo V. Evaluación de cuatro densidades de siembra de *Pueraria phaseoloides* (Roxb.) en una plantación forestal clonal de *Tectona grandis* L.f. para el manejo de arvenses

Resumen

[Introducción] La densidad de siembra de especies utilizadas como coberturas vivas es un factor determinante para el manejo de arvenses sin afectar el crecimiento del cultivo principal. [Objetivo] El objetivo del presente estudio fue evaluar cuatro diferentes densidades de siembra de *Pueraria phaseoloides* (kudzú) para el manejo de arvenses en una plantación forestal clonal de *Tectona grandis* L.f. [Metodología] La investigación fue realizada en el distrito de San Jorge, Los Chiles, Alajuela, Costa Rica y se utilizó un diseño experimental de cuatro bloques completos al azar con cinco tratamientos que consistieron en densidades de 0,125 kg/ha (T1), 0,250 kg/ha (T2), 0,375 kg/ha(T3), 0,625 kg/ha y un testigo donde se aplicó herbicida químico para el manejo de arvenses (T5). Se sembraron semillas de *P. phaseoloides* entre los carriles de las hileras de *T. grandis* y a los 90 y 180 días después de la siembra (dds) se midió la altura total de la *T. grandis* y su afectación por *P. phaseoloides*. Además, se evaluó el porcentaje de cobertura de *P. phaseoloides* a los 30, 60, 90, 120, 150 y 180 dds. [Resultados] Los resultados indican que el uso de una hilera de *P. phaseoloides* (T1) dentro de las plantaciones forestales de *T. grandis* clonales jóvenes, fue suficiente para ejercer un manejo efectivo de las arvenses, principalmente las de hoja ancha al compararlo con otras densidades; además, este tratamiento registró el mayor crecimiento en altura de la *T. grandis* después del testigo químico. El tratamiento de cinco hileras (T4) mostró un alto manejo de arvenses, sin embargo, la alta densidad afectó negativamente el crecimiento de los árboles. [Conclusión] El uso de *P. phaseoloides* como cobertura viva en plantaciones jóvenes de *T. grandis*, demostró ser una alternativa efectiva para el manejo de arvenses, logrando porcentajes de cobertura suficientes para suprimir las arvenses y proteger el suelo.

Palabras clave: agroecológica, arvenses, densidad de siembra, kudzu, silvicultura, supresión

Abstract

[Introduction] The sowing density of species used as live cover crops is a key factor for weed management without affecting the growth of the main crop. [Objective] The objective of this study was to evaluate four different sowing densities of *Pueraria phaseoloides* (kudzu) for weed management in a clonal *Tectona grandis* L.f. plantation. [Methodology] The research was conducted in the district of San Jorge, Los Chiles, Alajuela, Costa Rica, using a randomized complete block design with four blocks and five treatments: sowing densities of 0.125 kg/ha (T1), 0.250 kg/ha (T2), 0.375 kg/ha (T3), 0.625 kg/ha (T4), and a control where chemical herbicide was applied for weed management (T5). *P. phaseoloides* seeds were sown between the rows of *T. grandis*, and at 90 and 180 days after sowing (DAS), total height of *T. grandis* and its coverage by *P. phaseoloides* were measured. Additionally, *P. phaseoloides* coverage percentage was evaluated at 30, 60, 90, 120, 150, and 180 DAS. [Results] The results indicate that using a single row of *P. phaseoloides* (T1) within young clonal *T. grandis* plantations was sufficient to achieve effective weed management, particularly for broadleaf weeds, compared to other densities. This treatment also recorded the highest tree height growth after chemical control. The five-row treatment (T4) showed high weed control; however, the high density negatively affected tree growth. [Conclusion] The use of *P. phaseoloides* as a live cover crop in young *T. grandis* plantations proved to be an effective alternative for weed management, achieving sufficient coverage to suppress weeds and protect the soil.

Keywords: agroecological, weeds, sowing density, kudzu, silviculture, suppression.

Introducción

Las plantaciones forestales comerciales enfrentan múltiples desafíos relacionados con el manejo de arvenses, ya que prácticas inadecuadas pueden promover la pérdida de cobertura vegetal y la degradación de la calidad edáfica (Kremer y Meas, 2009; Zobiode *et al.*, 2011). Lo anterior ha sido observado frecuentemente en sistemas intensivos de producción, como los establecidos con *Tectona grandis* (teca), en los cuales el uso frecuente de herbicidas para el manejo de arvenses afecta negativamente la cobertura de sotobosque, desprotegiendo el suelo, además de representar un riesgo ambiental y de salud para aplicadores de estos agroquímicos (Zobiode *et al.*, 2011).

En este contexto, las coberturas vivas han sido propuestas como una alternativa agroecológica para competir con las especies de plantas arvenses y disminuir el uso de herbicidas sintéticos, además de mejorar la salud del suelo, conservar la humedad y reducir la erosión (Castillo-Mora, 2024; Cortés-Cortés *et al.*, (prensa); Vignola *et al.*, 2017). Entre las coberturas vivas destaca *Pueraria phaseoloides* (kudzu tropical) que es una leguminosa perenne y ampliamente utilizada en sistemas silvopastoriles y agrícolas. Se caracteriza por su capacidad de fijación biológica de N, su rápido establecimiento y su densa cobertura del suelo, lo que puede limitar el desarrollo de arvenses al competir por luz y nutrientes (Fuentes-Molina *et al.*, 2023; Tirape-Hidalgo, 2022).

En plantaciones clonales de *T. grandis*, esta cobertura ha logrado suprimir eficazmente las arvenses, alcanzando hasta un 100 % de cobertura del sitio a los 12 meses de establecimiento. No obstante, estudios advierten que altas densidades de siembra de *P. phaseoloides* pueden afectar negativamente el crecimiento de los árboles (Cortés-Cortés *et al.*, (prensa)). Por tanto, la efectividad de *P. phaseoloides* como estrategia de manejo agroecológico de arvenses en plantaciones forestales tropicales aún requiere mayor investigación, especialmente bajo condiciones locales; por ejemplo, es necesario evaluar densidades de siembra adecuadas.

Actualmente, existen pocos estudios que analicen de manera directa la influencia de la densidad de siembra de *P. phaseoloides* en sistemas forestales tropicales. Durante los últimos 20 años, se han desarrollado algunas investigaciones en regiones tropicales de Nicaragua, Cardoza-Olivas y Gutiérrez-Estrada (2010) evaluaron densidades de 1, 3 y 5 kg de semilla pura por hectárea en la finca Santa Rosa de la Universidad Nacional Agraria; en el mismo sitio, Quintanilla-Estrada y Ruiz-Nicaragua (2007) probaron espaciamientos de 50 × 50 cm, 60 × 60 cm y 70 × 70 cm, reportando que el espaciamiento de 60 × 60 cm (equivalente a 25 000 plantas por hectárea) ofrecía mejores resultados. Por su parte, Del Pozo *et al.* (2018) evaluaron diferentes densidades en una plantación de cacao en El Triunfo, provincia del Guayas, Ecuador y observaron que la siembra más densa (0,5 × 0,5 m, equivalente a 4 plantas m²) alcanzó un 99 % - 100 % de cobertura del suelo en cinco meses, reduciendo significativamente la presencia de arvenses. Estos estudios coinciden en que mayores densidades de siembra favorecen la cobertura vegetal, la producción de biomasa y el manejo de arvenses en sistemas tropicales.

En plantaciones de *T. grandis*, las evaluaciones previas se han enfocado principalmente en los efectos de *P. phaseoloides* sobre las propiedades del suelo y en parámetros de crecimiento de los árboles, dejando de lado el análisis de las densidades óptimas de siembra que permitan un adecuado desarrollo arbóreo y el manejo de arvenses. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes densidades de siembra de *P. phaseoloides* sobre la presencia de arvenses y el desarrollo de los árboles en una plantación joven de *T. grandis*.

Metodología

Establecimiento de parcela experimental

Se definió un lote de 8 000 m² en San Jorge de Los Chiles, Costa Rica, donde se plantaron árboles clonales de *T. grandis* y semillas de *P. phaseoloides*. Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (1996), el área corresponde al bosque húmedo tropical, el cual presenta un régimen climático con

temperaturas promedio entre 24 y 30 °C y precipitaciones anuales que varían entre 2 000 y 4 000 mm (Instituto de Desarrollo Rural [INDER], 2015), con suelos ultisoles (Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria [INTA], 2016). La preparación del terreno consistió en dejar el sitio desprovisto de vegetación mediante una aplicación de herbicidas (2 000 ml de glifosato en conjunto con 20 g de metsulfuron-metil/ha) con el fin de facilitar la plantación de los árboles clonales de *T. grandis*. Estos fueron llevados del vivero con una altura aproximada de entre 10 y 15 cm y se plantaron a un distanciamiento de 4 × 4 m en el campo para una densidad de 625 árboles/ha. El total de árboles plantados en el ensayo fue de 500 individuos, distribuidos en 4 bloques con 125 árboles por bloque y 25 por parcela de 400 m². A cada árbol se le realizó una aplicación de 80 g de fertilizante 10-30-10 (N-P-K) al momento de plantar. Luego se sembraron las semillas de *P. phaseoloides* con diferentes densidades según el tratamiento colocando cuatro semillas por punto de siembra (Tabla 14).

Tabla 14.

Descripción de los tratamientos y cantidad de semilla sembrada.

Tratamiento	Descripción	Cantidad de Semillas/ha	Densidad de semillas (kg/ha)
T1	Un punto de siembra	2 500	0,125
T2	Dos puntos de siembra	5 000	0,250
T3	Tres puntos de siembra	7 500	0,375
T4	Cinco puntos de siembra	12 500	0,625
T5*	Herbicidas químicos	-	-

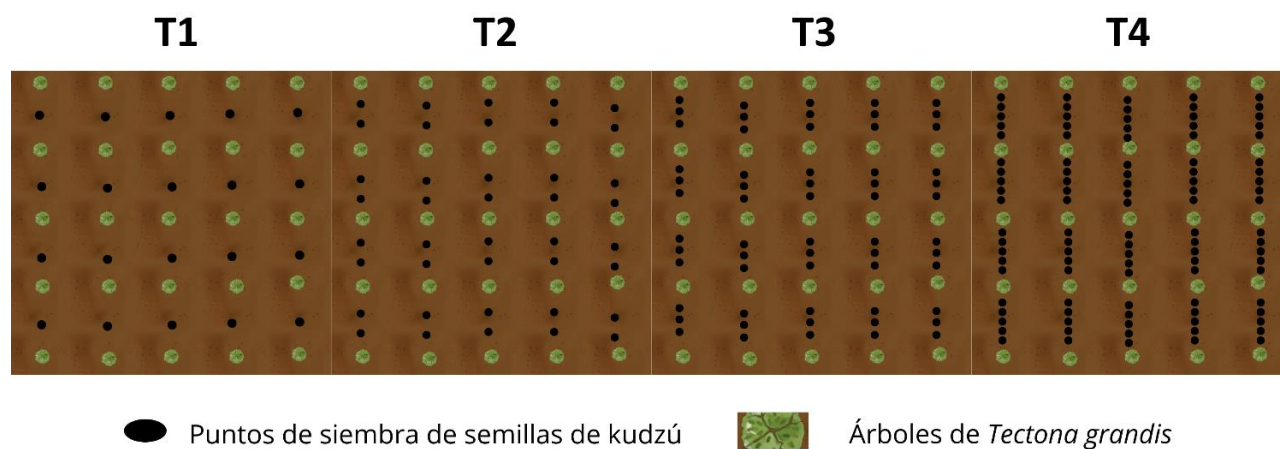
Nota. *La dosis de herbicida fue de 712 g de glifosato por hectárea (2 L en 200 L de agua) más 20 g de metsulfuron metilo por hectárea. Elaboración propia, 2025.

La semilla se sembró manualmente por esqueje, a una profundidad de entre 2 y 3 cm, según lo indicado por Arronis-Díaz (2008), 15 días después de la siembra (dds) de los árboles de *T. grandis*, cuando el área se encontraba desprovista de plantas arvenses según lo recomendado por Arguedas-Gamboa *et al.* (2018).

En el tratamiento de un solo punto de siembra (T1) se ubicó en el centro de la entrecalle, con una distancia de 2 m hasta el árbol en ambos lados, mientras que para el T2 (dos puntos) y T3 (tres puntos) la distancia hasta el árbol fue de 1,5 m en ambos lados; en el T4 la distancia fue de 1 m. En los tratamientos que contenían más de dos puntos de siembra (T2, T3 y T4) la distancia entre puntos fue de 50 cm (Figura 6). Por su parte, para la distribución de los tratamientos en los bloques, se consideró la pendiente, de manera que en todos los tratamientos existieran las mismas condiciones topográficas (Figura 7).

Figura 6

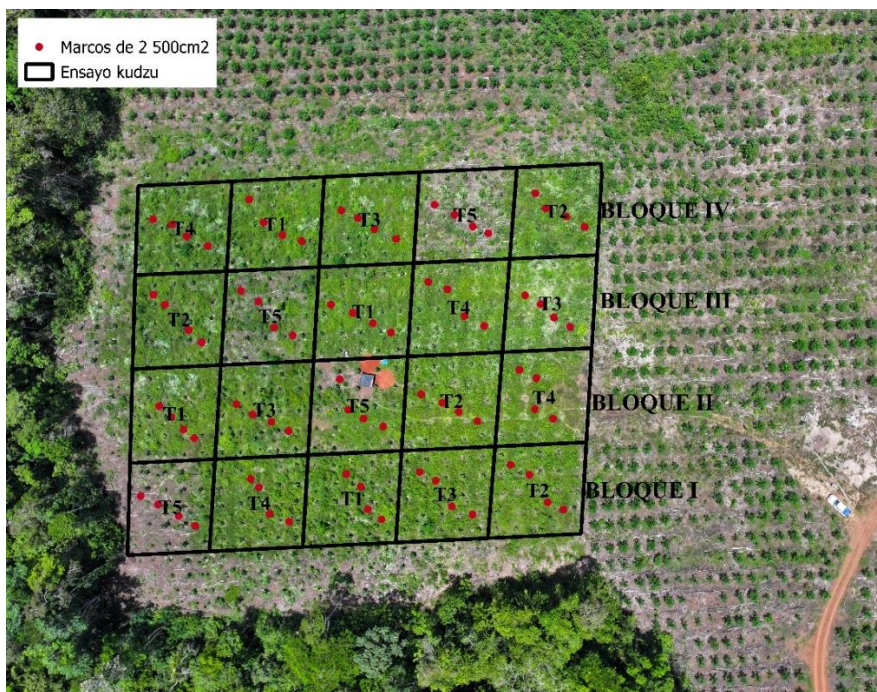
Descripción gráfica de los tratamientos de densidad de semillas de P. phaseoloides en Pocosal, 2024.



Nota. Elaboración propia, 2025.

Figura 7

Distribución de los tratamientos en el sitio experimental. Fotografía aérea a los 180 días después de la siembra.



Nota. Elaboración propia, 2025.

Determinación de efectos de *P. phaseoloides* sobre el cultivo de *T. grandis* y las arvenses

Con el objetivo de evaluar el establecimiento del *P. phaseoloides* y su influencia en la dinámica de arvenses y árboles de *T. grandis*, se estimó el porcentaje de germinación a los 15 dds. Para ello, se recorrió cada hilera contabilizando la cantidad de puntos de siembra que presentaron plántulas de *P. phaseoloides* y relacionándolo con el total de plántulas que debían emerger según el tratamiento. Por ejemplo, para el tratamiento T3 (0,375 kg/ha) debía haber tres puntos de siembra con plántulas, pero en caso de encontrar solo uno se anotaba una germinación del 33,3 %, para dos un 66,6 % y para tres un 100 %

Se determinaron los porcentajes de cobertura en 4 puntos de cada parcela de 400 m² mediante marcos de 2 500 cm² (50 × 50 cm), colocados dentro de cada tratamiento de forma que dos de los puntos estuvieran dentro de los carriles de siembra de *P. phaseoloides* y los otros dos fuera de ellos a una distancia aproximada entre puntos de 2,5 m. Durante la primera evaluación a los 30 dds se georreferenciaron los puntos mediante GPS para realizar las evaluaciones posteriores (60, 90, 120 y 180 dds) en los mismos puntos (Figura 7). La georreferenciación de los puntos de evaluación permitió la elaboración de un mapa en formato PDF navegable como guía de localización. Además, se colocaron dos estacas opuestas por marco para facilitar su reubicación en campo.

En el área dentro de los marcos se estimó visualmente el porcentaje de cobertura correspondiente a arvenses de hoja ancha, hoja angosta y *P. phaseoloides*, siguiendo la metodología propuesta por Pozo-Lira *et al.* (2016). Esta información permitió observar la evolución temporal de las distintas coberturas y su distribución porcentual en los mismos puntos. Se realizaron seis evaluaciones por tratamiento, con un total de 30 mediciones por bloque y 120 en todo el experimento.

Con el fin de evaluar el efecto del crecimiento del *P. phaseoloides* sobre el desarrollo de los árboles de *T. grandis*, se valoró el ascenso del *P. phaseoloides* sobre los árboles a los 90 y 180 dds mediante una escala ordinal del 0 al 4 de la siguiente manera:

- 0: sin presencia de *P. phaseoloides* sobre el árbol.
- 1: *P. phaseoloides* presente en la base del árbol.
- 2: *P. phaseoloides* cubriendo hasta el 25 % de la altura del árbol.
- 3: *P. phaseoloides* cubriendo hasta el 50 % de la altura del árbol.
- 4: *P. phaseoloides* alcanzando la copa del árbol.

Para determinar posibles efectos de la cobertura sobre el crecimiento vertical, se midió la altura total de los árboles utilizando una cinta métrica y se contabilizó la salida de árboles por mortalidad. En la primera evaluación (90 dds) se midieron los 500 árboles del ensayo, incluyendo los árboles de los bordes, mientras que en la segunda (180 dds) se evaluaron 180 árboles excluyendo los árboles presentes en los bordes. Las mediciones coincidieron con las evaluaciones de cobertura de *P. phaseoloides*, lo que permitió relacionar el desarrollo de la cobertura con el crecimiento en altura de los árboles.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de las variables de respuesta consistió en análisis de varianza con pruebas de medias de Tukey para las variables paramétricas (altura, escala de estado fitosanitario) y una prueba de Kruskal-Wallis para los datos no paramétricas (porcentaje de cobertura). El análisis se llevó a cabo utilizando el lenguaje de programación R con R-Studio.

Resultados y discusión

Manejo de arvenses

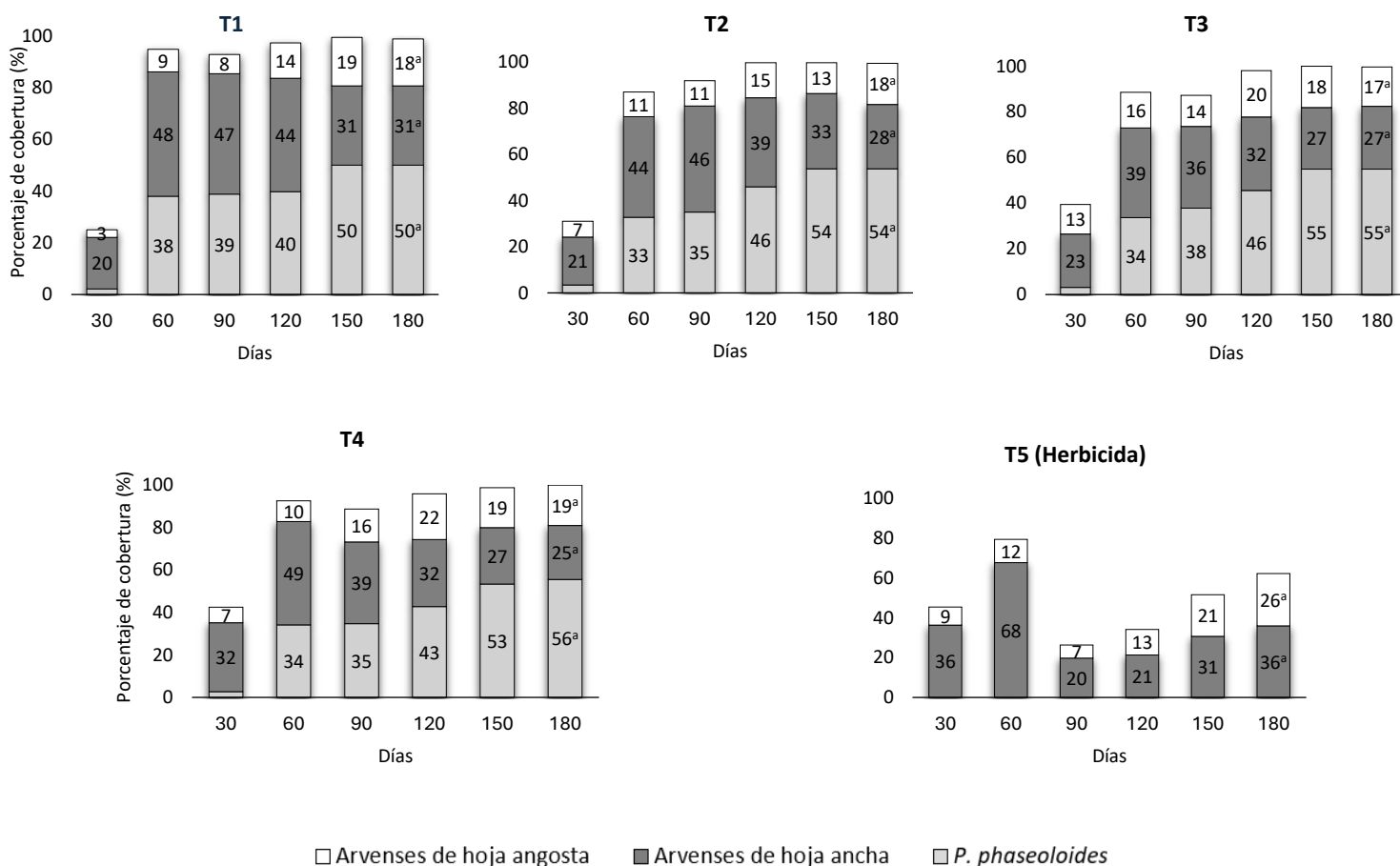
La germinación de las semillas de *P. phaseoloides* tuvo un promedio de 88 % sin diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$). El tratamiento con densidad de 0,125 kg/ha (T1) y el de 0,375 kg/ha (T3) registraron una germinación del 90 % mientras que el tratamiento con 0,625 kg/ha (T4) registró un valor de 88 %. El tratamiento con menor porcentaje de germinación fue 0,250 kg/ha (T2) con un 85 %. Otros estudios que evaluaron la germinación señalan porcentajes que superan el 90 %, incluso alcanzando el 100 % (Cardoza-Olivas y Gutiérrez-Estrada, 2010; Quintanilla-Estrada y Ruiz-Nicaragua, 2007). Este resultado indica que la germinación presentó un comportamiento

similar en todos los tratamientos, sin ser este un factor diferencial sobre las variables evaluadas (p.e. supresión de arvenses).

En términos de supresión de arvenses, los resultados muestran que la siembra de *P. phaseoloides* influyó en la dinámica de competencia cobertura-arvenses del agroecosistema, coincidiendo con los resultados de otros estudios como el de Huerta-Olague *et al.* (2018). En todos los tratamientos que incluyeron *P. phaseoloides* se observó una ocupación del espacio de hasta el 56 % y una reducción paulatina del área ocupada por arvenses de hasta un 24 % entre los 60 y 180 dds, mientras que en el tratamiento aplicado con herbicida (T5) la supresión de arvenses fue similar (22 %) en el mismo periodo de comparación (Figura 8). Los resultados señalan una adecuada supresión de arvenses mediante las coberturas vivas y una optimización del uso del espacio en el carril inter-árboles en plantaciones de *T. grandis* clonales (Hernández-Rodríguez, 2017).

Figura 8

Porcentaje de cobertura de P. phaseoloides, arvenses de hoja ancha y de hoja angosta, según tratamiento. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$).



Nota. T1= 0,125 kg ha⁻¹, T2= 0,250 kg ha⁻¹, T3= 0,375 kg ha⁻¹, T4= 0,625 kg ha⁻¹, T5=Herbicida químico.

Elaboración propia, 2025.

En cuanto a la supresión específica de arvenses de hoja ancha, se pudo observar que con una densidad de 0,125 kg/ha (T1) la reducción se logró a los 150 dds, mientras que con 0,250 kg/ha (T2), 0,375 kg/ha (T3) y 0,625 kg/ha (T4) se alcanzó a los 120 días. Esta diferencia en el tiempo necesario para suprimir las arvenses sugiere que un mayor número de hileras de *P. phaseoloides* favorece una competencia temprana con las arvenses, permitiendo que la cobertura se consolide en un plazo más

corto. En otras palabras, mientras una densidad de 0,125 kg/ha requiere un período ligeramente más prolongado para ejercer una supresión efectiva, los tratamientos con dos o más hileras (T2, T3 y T4) demostraron un efecto competitivo temprano que contribuyó a un manejo más oportuno en términos de espacio y recursos. No obstante, hay que considerar el potencial efecto negativo de *P. phaseoloides* sobre los árboles debido a que es una especie trepadora.

A los 180 dds, se observó que las diferencias en la cobertura de *P. phaseoloides* entre una densidad de 0,125 kg/ha (T1) y 0,655 kg/ha (T4) fueron mínimas, lo que sugiere que no es necesario utilizar una alta densidad de siembra para lograr una supresión efectiva de las arvenses (Figura 8). En T1, una única hilera alcanzó aproximadamente un 50 % de cobertura, mientras que en T4, con cinco hileras, se llegó a cerca del 56 %. Aunque este incremento podría interpretarse como una mejora, la diferencia porcentual es mínima y no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre estos tratamientos ($p > 0,05$). En la práctica, esto indica que una mayor densidad de la cobertura no se traduce en un manejo superior de las arvenses a los 180 dds.

Al analizar el avance de *P. phaseoloides* por el terrero de la plantación de *T. grandis* se registró que a los 90 dds en la densidad de 0,625 kg/ha (T4) ya había avanzado cerca de 2 m desde el punto de siembra mientras que para los tratamientos de menor densidad el avance de la misma distancia se presentó hasta los 150 dds.

De forma complementaria, la evaluación de la cobertura de arvenses de hoja ancha reveló que a los 180 dds en el tratamiento de densidad de 0,125 kg/ha se redujeron en un 30 % con respecto a los 120 dds, mientras que en el tratamiento de 0,625 kg/ha estas arvenses de hoja ancha se redujeron en un 22 % en el mismo rango de tiempo. Estos resultados evidencian que, pese a la mayor densidad de siembra en T4, la supresión de las arvenses no se incrementó de manera significativa en comparación con T1. Se puede inferir, por tanto, que una única hilera de *P. phaseoloides* es suficiente para limitar

efectivamente el crecimiento de las arvenses, manteniendo un manejo adecuado y evitando la necesidad de incrementar la densidad de siembra, lo que podría elevar tanto los costos como la complejidad del manejo sin aportar beneficios proporcionales.

Los resultados obtenidos en este experimento son consistentes con lo reportado en otros sistemas agrícolas y forestales. Por ejemplo, en plantaciones de palma aceitera (*Elaeis guineensis*), Corley y Tinker (2016) indican que *P. phaseoloides* puede alcanzar coberturas superiores al 70 % en menos de seis meses, logrando una efectiva supresión de arvenses, similar a lo observado en nuestros tratamientos con *P. phaseoloides* a los 180 dds.

En plantaciones forestales, estudios como los de Cortés-Cortés *et al.* (prensa) en sistemas de *T. grandis* clonal, han demostrado que *P. phaseoloides* establece coberturas superiores al 25,9 % a los 90 dds y al 84,0 % a los 390 dds utilizando una densidad de 13,5 kg/ha, favoreciendo la reducción de arvenses de hoja ancha. Comparado con lo anterior, los resultados del presente estudio muestran cobertura a los 90 dds de 39 % con solo una hilera de siembra (0,125 kg/ha), lo que sugiere que el establecimiento de *P. phaseoloides* en sistemas forestales puede ser igualmente exitoso con densidades moderadas de siembra, optimizando así el manejo de recursos.

Estos hallazgos invitan a replantear la necesidad de altas densidades de siembra de *P. phaseoloides* para un manejo adecuado de arvenses. La eficacia se logra con menor cantidad de hileras, lo cual tiene importantes implicaciones económicas y prácticas en el manejo agroforestal, permitiendo optimizar recursos.

Efectos sobre el crecimiento de los árboles

En cuanto al crecimiento de los árboles, medido a través de la variable altura, los resultados a los 180 dds muestran diferencias notables entre los tratamientos, aunque no siempre proporcionales al

número de hileras de *P. phaseoloides* sembradas. Los tratamientos con cobertura viva (T1 a T4) evidenciaron un crecimiento en altura comparable entre ellos, pero con menor crecimiento con respecto al testigo con herbicida (T5). Este resultado es esperable ya que al eliminar todas las arvenses, los árboles pueden alcanzar una mayor altura (Aparicio *et al.*, 2018; Barrios *et al.*, 2011). No obstante, entre el uso de una hilera (T1) y el testigo químico (T5) no hubo diferencias estadísticamente significativas de crecimiento ($p > 0,05$).

Específicamente, el tratamiento de densidad de 0,125 kg/ha (T1), con una sola hilera de *P. phaseoloides*, alcanzó un promedio de altura de 1,77 m, siendo el valor más alto de todos los tratamientos con cobertura viva. Este resultado es similar al observado con densidad de 0,375 kg/ha (1,67 m), donde se sembraron tres hileras. En cambio, el tratamiento T2, con dos hileras (0,250 kg/ha), mostró un crecimiento promedio menor (1,27 m), al igual que T4 (1,42 m), donde se usaron cinco hileras para una densidad de 0,625 kg/ha (Tabla 15). Esto indica que un mayor número de hileras no se traduce en un mayor crecimiento, y que densidades moderadas de cobertura permiten un mejor balance entre supresión de arvenses y disponibilidad de recursos para el crecimiento de los árboles.

Según Salazar *et al.* (2025), al utilizar herbicidas químicos en plantaciones forestales de *T. grandis* clonal, el crecimiento en altura a los 180 días fue de entre 0,73 m y 1,87 m, dependiendo de la cantidad de área aplicada con herbicida. La altura máxima registrada por estos autores coincide con los resultados del testigo del presente estudio y es un 5 % más alta que la registrada al utilizar el T1 (cobertura viva de una hilera).

Tabla 15.

Crecimiento en altura (m) y mortalidad de T. grandis según tratamiento en experimento de densidad de siembra de P. phaseoloides, Pocosol, 2024.

Tratamiento	n	Altura (m) a los 90 días			n	Altura (m) a los 180 días			Mortalidad
		Mín	$\bar{x}$	Máx		Mín	$\bar{x}$	Máx	
T1	94	0,19	$0,74 \pm 0,24^a$	1,40	34	0,50	$1,75 \pm 0,54^{ab}$	2,85	6
T2	94	0,11	$0,61 \pm 0,24^a$	1,15	34	0,47	$1,37 \pm 0,45^c$	2,05	6
T3	99	0,14	$0,72 \pm 0,28^a$	1,40	36	0,38	$1,67 \pm 0,66^{abc}$	2,70	1
T4	88	0,16	$0,72 \pm 0,31^a$	1,66	31	0,60	$1,42 \pm 0,51^{bc}$	2,60	12
T5	98	0,11	$0,62 \pm 0,28^a$	1,46	36	1,00	$1,86 \pm 0,50^a$	3,03	2

Nota. T1= un punto de siembra, T2= dos puntos de siembra, T3= tres puntos de siembra, T4= cinco puntos de siembra, T5=Herbicida químico. Mín.= mínimo, Máx.= máximo, $\bar{x}$ = promedio. Letras diferentes representan diferencias estadísticamente significativas. Elaboración propia, 2025.

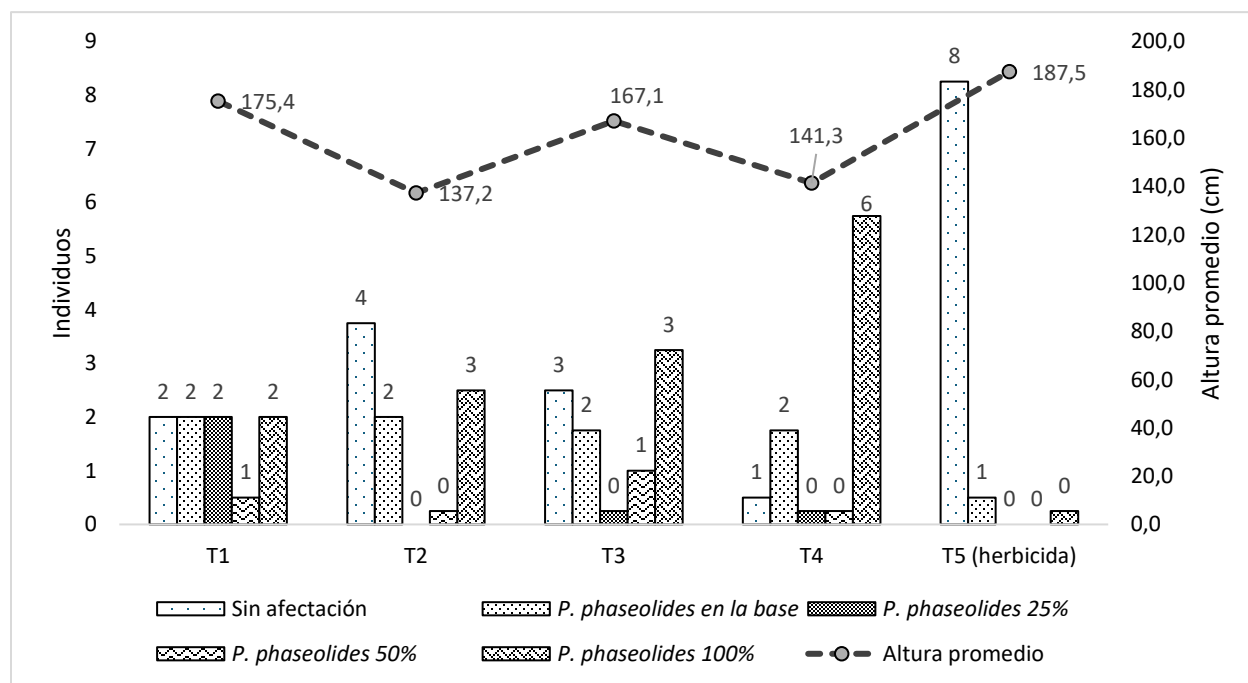
Aunque el testigo químico mostró un crecimiento aceptable, es relevante destacar que el uso de *P. phaseoloides* a una densidad de 0,125 kg/ha no solo permitió un crecimiento similar (T1), sino que además podría estar contribuyendo positivamente al microclima del suelo, conservación de humedad y mejorando de la estructura edáfica, factores que suelen beneficiar el desarrollo posterior de las especies forestales (Rolo *et al.*, 2023).

En cuanto a la mortalidad el tratamiento de mayor densidad (T4= 0,625 kg/ha) presentó la mayor mortalidad (12 plantas), lo que podría estar relacionado con una competencia excesiva por luz y nutrientes debido a la alta densidad de *P. phaseoloides*, lo cual refuerza la idea de que no es necesario recurrir a densidades elevadas para obtener buenos resultados en el manejo de arvenses (cobertura) sin afectar el crecimiento. Según Barrios *et al.* (2011), el manejo temprano de arvenses es fundamental para la sobrevivencia de los árboles en una plantación forestal indicando que la sobrevivencia puede aumentar un 50 % y hasta un 90 %.

La evaluación de la afectación de *P. phaseoloides* sobre los árboles de *T. grandis* evidenció una clara relación entre la densidad de siembra de la cobertura y su comportamiento como planta trepadora. En el tratamiento T1 (una hilera de *P. phaseoloides*), el 38 % de los árboles no mostró ningún nivel de afectación, mientras que en T2 y T3 este porcentaje fue del 43 % y 31 %, respectivamente (Figura 9). Sin embargo, en el tratamiento T4 (cuatro hileras), se observó un incremento marcado en la afectación, con un 58 % de los árboles alcanzados hasta la copa por *P. phaseoloides* (afectación categoría 4).

Figura 9

Nivel de afectación de P. phaseoloides sobre los árboles clonales de T. grandis, en Pocosal, 2024.



Nota. Elaboración propia, 2025.

En contraste, el tratamiento T5, donde se utilizó herbicida, presentó el mayor porcentaje de árboles sin afectación (90 %) y ningún individuo con *P. phaseoloides* trepando más allá de la base. Esto confirma el efecto supresor del herbicida, aunque su uso también resultó en una cobertura vegetal mucho menor. En términos de crecimiento, los datos de altura promedio evidencian diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos con coberturas vivas con respecto al testigo y entre las de mayor o menor densidad de siembra, lo que sugiere que, a los 180 dds, la presencia de *P. phaseoloides* tuvo un impacto negativo severo sobre el desarrollo vertical de la *T. grandis* cuando la densidad de siembra es mayor a los 0,625 kg/ha. En este sentido, se observa una tendencia decreciente en la altura en el tratamiento T4 (141,3 cm), coincidiendo con el mayor grado de afectación por *P. phaseoloides*, en comparación con T1 (175,4 cm) y T3 (167,1 cm), donde la afectación fue menor.

Este resultado indica que, aunque *P. phaseoloides* puede cubrir los árboles sin afectar significativamente su altura a corto plazo, su presencia sobre el fuste y la copa podría generar consecuencias negativas en el mediano y largo plazo, especialmente si no se realiza un manejo adecuado de la cobertura. Cabe señalar que existen otras condiciones de micrositio entre las parcelas que pueden generar una influencia indirecta en el crecimiento de los árboles que no fueron considerados en el análisis del presente estudio.

Conclusiones y recomendaciones

El uso de *P. phaseoloides* como cobertura viva en plantaciones jóvenes de *T. grandis* demostró ser una alternativa efectiva para el manejo de arvenses, logrando porcentajes de cobertura suficientes para suprimir las arvenses y proteger el suelo. El tratamiento T1 (una hilera de *P. phaseoloides*) presentó una cobertura total similar a la del T5 (herbicida), lo que evidencia su potencial como herramienta agroecológica para la reducción del uso de herbicidas químicos. A pesar del buen desempeño de *P. phaseoloides* como cobertura, se observó una tendencia a trepar los árboles, especialmente en

densidades altas como en el tratamiento T4, donde más del 50 % de los árboles se vieron completamente cubiertos a los 6 meses (180 dds).

Si bien no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la altura de los árboles entre tratamientos a los 180 días, una afectación elevada por *P. phaseoloides* podría comprometer el crecimiento a largo plazo. Por tanto, una densidad moderada de siembra, como la de 0,125 kg/ha (T1), permite mantener un adecuado equilibrio entre manejo de arvenses, crecimiento del arbolado y reducción de afectación por trepamiento. Es importante mencionar que los beneficios anteriores se obtienen a base de brindar mantenimiento adecuado de *P. phaseoloides*, ya que, por ser una planta trepadora y perenne, puede afectar el desarrollo de los árboles y la calidad de la madera.

Referencias

- Aparicio, J.L., Maggio, A. y Fragueiro, L. (2018). *Control de malezas de Eucalyptus grandis: respuesta a diferentes anchos y periodos de control*. En XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia.
- Arguedas-Gamboa, M., Rodríguez-Solís, M., Guevara-Bonilla, M., Esquivel-Segura, E., Sandoval-Rocha, S. y Briceño-Elizondo, E. (2018). Incidencia y severidad de *Olivea tectonae* y *Rhabdopterus sp.* en plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* l. f. bajo distintas modalidades de control de arvenses. *Agronomía Costarricense*. 43(1), 9-19. <https://dx.doi.org/10.15517/rac.v43i1.35631>
- Arronis-Díaz, V. (2008). *Banco forrajero de kudzu (Pueraria phaseoloides) para producción de carne y leche*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1467.pdf>
- Barrios, A., López, A.M., Nieto, V., Burgos, N., Yaya, M. y González, I. (2011). Efecto del control de malezas y fertilización sobre el crecimiento inicial de una plantación de *Gmelina arborea* Roxb.

en el departamento del Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 14(1), 31-40.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392011000100004

Cardoza Olivas, A., y Gutiérrez Estrada, E. (2010). *Evaluación de densidades de siembra en la producción de semilla de Pueraria phaseoloides (Roxb.) Benth. bajo condiciones de trópico seco*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua].

Castillo-Mora, M. (2024). *Clasificación de las principales especies de flora arvense asociadas a plantaciones jóvenes de Tectona grandis L.f y Gmelina arborea Roxb en el Pacífico Sur de Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica].

Corley, R. H. V., y Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm* (5th ed.). Chichester, UK: Wiley Blackwell.

<https://doi.org/10.1002/9781118953297>

Cortés-Cortés, M.L., Murillo-Cruz, R.A., Ramírez-Muñoz, F., Rigg-Aguilar, P., Zalasars-Ruiz, A.G y Carvajal-Arroyo, D.A. (en prensa). Efecto de las coberturas *Crotalaria juncea* L., *Pueraria phaseoloides* (Roxb.) Benth. y *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek sobre el control de plantas arvenses en una plantación clonal de *Tectona grandis* L. f. en Costa Rica.

Del Pozo, S., Castro, J., y Delgado, J. (2018). Evaluación de distintas densidades de siembra de kudzu tropical (*Pueraria phaseoloides*) como alternativa de cobertura vegetal en plantaciones de cacao en la zona agrícola del cantón El Triunfo, provincia del Guayas. *Revista de Investigación y Ciencia*, 27(1), 63–70.

https://www.researchgate.net/publication/323905176_Evaluacion_de_distintas_densidades_de_siembra_de_kudzu_tropical_Pueraria_phaseoloides_como_alternativa_de_cobertura_vegetal_en_plantaciones_de_cacao_en_la_zona_agricola_del_canton_El_Triunfo_provincia

- Fuentes-Molina, N., Varela-Martinez, D. A. y Garcia-Solano, D. (2023). Cultivos de cobertura como alternativa sostenible: análisis de *Pueraria phaseoloides* en suelos tropicales. *Información Tecnológica*, 34(1), 47-58. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642023000100047>
- Hernández-Rodríguez, P. (2017). *Efecto De Diferentes Métodos De Control De Arvenses En Las Propiedades Del Suelo, En Plantaciones De Teca, Tectona Grandis (L.F.)*. [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
- Holdridge L. R. (1996). *Ecología basada en zonas de vida*. Quinta Reimpresión. San José, Costa Rica, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Huerta-Olague, J.J, Oropeza Mota, J.L., Guevara Gutiérrez, R. D., Ríos Berber, J.D., Martínez Menes, M.R., Barreto García, O.A., Olguín López, J.L. y Mancilla Villa, O.R. (2018). Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo. *Idesia (Arica)*, 36(2), 153-162. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005000701>
- Instituto de Desarrollo Rural. (2015). *Informe de Caracterización Básica: Territorio San Carlos-Peñas Blancas-Río Cuarto. Oficina Subregional de San Carlos. Dirección Huetar Norte, Costa Rica.* <https://www.inder.go.cr/san-carlos-penas-blancas-río-cuarto/Caracterizacion-San-Carlos-Penas-Blancas-Rio-Cuarto.pdf>
- Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. (2014). *Suelos de Costa Rica: orden Ultisoles*. Ficha técnica 1. <http://www.platicar.go.cr/images/buscador/documents/pdf/07/00517-boletin-suelos-de-cr.pdf>

- Kremer, R. J., & Means, N. E. (2009). Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *European Journal of Agronomy*, 31(3), 153-161.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.004>
- Pozo-Lira, A., Alvarado-Aguayo, A., Carrera-Mariduaña, B., Pilaloe-David, W. (2016). *Evaluación de distintas densidades de siembra de kudzu tropical (Pueraria phaseoloides) como alternativa de cobertura vegetal en plantaciones de cacao en la zona agrícola del cantón El Triunfo, provincia del Guayas*. [Tesis de grado, Universidad Agraria del Ecuador].
- Quintanilla Estrada, W., y Ruiz Nicaragua, F. (2007). *Evaluación de tres distanciamientos de siembra en la producción de semilla de Pueraria phaseoloides (Roxb.) Benth. bajo condiciones de trópico seco*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria, Nicaragua].
- Rolo, V., Rivest, D., Maillard, É., & Moreno, G. (2023). Agroforestry potential for adaptation to climate change: A soil-based perspective. *Soil Use and Management*, 39(3), 1006–1032.
<https://doi.org/10.1111/sum.12932>
- Tirape-Hidalgo, G. (2022). *Beneficios de la Pueraria phaseoloides, como cobertura del suelo en el cultivo de Palma Aceitera (Elaeis guineensis) en el Ecuador*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13274>
- Vignola, R., Watler, W., Poveda, K., Berrocal, A y Vargas, A. (2017). *Cultivo de palma aceitera en Costa Rica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.
<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8163.pdf>

Capítulo VI: Conclusiones y recomendaciones generales

Conclusiones

1. La implementación de prácticas alternativas, como el uso de coberturas vivas (*Pueraria phaseoloides*, *Vigna radiata* y *Crotalaria juncea*) y la reducción del área de aplicación de herbicidas sintéticos, son viables para el manejo de arvenses en plantaciones clonales de *Tectona grandis*. Estas estrategias permiten mantener un crecimiento dasométrico adecuado sin comprometer significativamente la salud del suelo ni la productividad del sistema forestal.
2. El establecimiento de coberturas vivas, en especial la combinación de *V. radiata* y *C. juncea*, así como el uso de *P. phaseoloides*, promovió mejoras sustanciales en las propiedades fisicoquímicas del suelo, como el incremento en el contenido de materia orgánica, N total y saturación de Ca, así como una reducción en la acidez y en la resistencia mecánica del suelo. Estos cambios son indicativos de una mejora en la funcionalidad edáfica y en las condiciones para el desarrollo radicular de *T. grandis*.
3. La aplicación dirigida de herbicidas en franjas de 1,2 m y 2,4 m demostró ser suficiente para mantener niveles aceptables de manejo de arvenses, con un crecimiento comparable al tratamiento de aplicación de herbicida en el área total. Esta práctica redujo entre 25 % y 68 % la cantidad total de herbicida aplicado, dependiendo del sitio experimental, lo que implica una disminución en los costos de producción y en la presión química sobre el agroecosistema.
4. No se detectaron variaciones significativas en la composición y abundancia de los grupos tróficos de nematodos del suelo (fitoparásitos, bacteriófagos, micófagos y depredadores) quince días después de la aplicación de herbicidas. Sin embargo, se recomienda cautela en la

interpretación de estos resultados, ya que los posibles efectos acumulativos podrían manifestarse en escalas temporales más amplias.

5. Se recomienda la inclusión de *P. phaseoloides* como cobertura viva en plantaciones forestales, particularmente a densidades de siembra de 0,125 kg/ha, por su capacidad de suprimir arvenses, mejorar la calidad del suelo y reducir el uso de herbicidas. No obstante, es imprescindible implementar manejos silviculturales adecuados para prevenir el trepamiento excesivo sobre los fustes de *T. grandis*.

Recomendaciones

1. La adopción de franjas de aplicación parcial (1,2 m o 2,4 m) debe considerarse una práctica estándar en el manejo silvicultural de *T. grandis*, ya que permite mantener la productividad forestal con menores costos económicos y ambientales en comparación con la aplicación total.
2. Es fundamental establecer protocolos de monitoreo continuo para evaluar los efectos acumulativos de los herbicidas y las coberturas vivas sobre la biota del suelo. En particular, el seguimiento de comunidades de nematodos puede ofrecer información relevante sobre la resiliencia edáfica y la estabilidad ecológica del sistema.
3. Se recomienda integrar una evaluación de los cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo al utilizar coberturas vivas en periodos más prolongados de tiempo y en perfiles más profundos del suelo ya que en la presente investigación el testigo fue absoluto y la profundidad fue de 5 cm.
4. Realizar la incorporación de variables a nivel microbiológico como la abundancia y diversidad de microorganismos (bacterias, hongos, arqueas, etc.), la actividad microbiana (medida por la respiración del suelo o la actividad enzimática), y la biomasa microbiana en los suelos utilizados con coberturas vivas para el control de arvenses.
5. Se recomienda realizar el muestreo de nematodos en próximas investigaciones a diferentes niveles de profundidad como 10 cm, 20 cm y hasta los 30 cm debido a que las raíces de los árboles suelen ser profundos a edades más avanzadas.

Capítulo VII. Referencias

- Adams, P., Beadle, C., Mendham, N. & Smethurst, P. (2003). The impact of timing and duration of grass control on growth of a young eucalyptus globulus labill. plantation. *New Forests*, 26(2), 147-165.
<https://doi.org/10.1023/A:1024490707175>
- Alemán-Zeledón, F. (2004). *Manejo de arvenses en el trópico*. Imprimatur.
<https://repositorio.una.edu.ni/2799/1/nh60a3672004.pdf>
- Alvarado, A. y Mata, R. (2013). *Condiciones de sitio y la silvicultura de la teca. Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2854>
- Alvarado-Prado, R., Salazar-Ugalde, M., Montero-Chaves, Y. y Fallas-Valencia, I. (2022). *Diagnóstico de personas afectadas por patologías, dolencias y accidentes vinculados al uso, exposición, lixiviación, dispersión, bioacumulación, consumo indirecto y directo de plaguicidas en costa rica y sus tratamientos*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
<https://impactoplaguicidas.cr/wp-content/uploads/2022/04/salud-2022-final-con-nota.pdf>
- Álvarez, J., Venegas, R. y Pérez, C. (2004). Impacto de la duración y geometría del control de malezas en la productividad de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en cinco ecosistemas del sur de Chile. Nota Técnica. *Bosque*, 25(2), 57-67. [10.4067/S0717-92002004000200006](https://doi.org/10.4067/S0717-92002004000200006)
- Álvarez, R. (2019). *Caracterización físico-mecánica de la madera de teca tectona grandis l.f. proveniente de una plantación en Chanchamayo-Perú*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/4947>

- Aparicio, J.L., Maggio, A. y Fragueiro, L. (2018). *Control de malezas de Eucalyptus grandis: respuesta a diferentes anchos y periodos de control*. XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia. 1-5.
https://www.researchgate.net/publication/328942352_CONTROL_DE_MALEZAS_DE_Eucalyptus_grandis_RESPUESTA_A_DIFERENTES_ANCHOS_Y_PERIODOS_DE_CONTROL
- Arguedas-Gamboa, M., Rodríguez-Solís, M., Guevara-Bonilla, M., Esquivel-Segura, E., Sandoval-Rocha, S. y Briceño-Elizondo, E. (2018). Incidencia y severidad de *Olivea tectonae* y *Rhabdopterus sp.* en plantaciones jóvenes de *Tectona grandis* L. f. bajo distintas modalidades de control de arvenses. *Agronomía Costarricense*. 43(1), 9-19.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/download/35631/36325?inline=1>
- Arronis-Díaz, V. (2008). *Banco forrajero de kudzu (Pueraria phaseoloides) para producción de carne y leche*. InfoAgro Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería.
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/AV-1467.pdf>
- Avellanada, M. (2022). *Efecto del glifosato sobre la población de Azotobacter spp. presente en el suelo cafetalero de El Dorado, Moyobamba – San Martín*. [Tesis de licenciatura, Universidad Católica Sedes Sapientiae Facultad De Ingeniería Agraria]. <https://hdl.handle.net/20.500.14095/1568>
- Badilla-Valverde, Yorleny, & Murillo-Gamboa, Olman. (2022). *Tectona grandis* L.f. clonal selection for the dry Pacific zone of Costa Rica. *Uniciencia*, 36(1), 304-318. <https://dx.doi.org/10.15359/ru.36-1.19>
- Barrantes-Madrigal, K., Murillo-Cruz, R., Ávila-Arias, C., Fonseca-González, W., y Barquero-Elizondo, A. I. (2021). Tabla de volumen comercial para teca clonal en diferentes índices de sitio en la Zona Norte de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 211-229.
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215-38962021000100211&script=sci_arttext#B15

Barrios, A., López, A.M., Nieto, V., Burgos, N., Yaya, M. y González, I. (2011). Efecto del control de malezas y fertilización sobre el crecimiento inicial de una plantación de *Gmelina arborea* Roxb. en el departamento del Tolima, Colombia. *Colombia Forestal*, 14 (1), 31-40.

<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2011.1.a03>

Barrios-Maestre, R., Fariñas, J., Silva-Acuña, R. y Sanabria, D. (2011). Comportamiento de cinco especies de leguminosas como cobertura viva en palma aceitera en el estado Monagas, Venezuela.

Idesia, 29(2), 29-37. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000200004>

Benavides-Fallas, R. (2022). *Desempeño de clones de Gmelina arborea roxb. en tres sitios de la Región Huetar Norte, Costa Rica*. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Costa Rica].

<http://hdl.handle.net/11056/25344>

Blanco, Y. y Leyva, A. (2007). Las arvenses en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos como hospederas de enemigos naturales. *Cultivos Tropicales*, 28(2), 21-28.

<https://www.redalyc.org/pdf/1932/193217731003.pdf>

Blanco-Valdes, Y. (2016). El rol de las arvenses como componente en la biodiversidad de los agroecosistemas. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 34-56. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362016000400003&script=sci_arttext&tlng=pt)

[59362016000400003&script=sci_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362016000400003&script=sci_arttext&tlng=pt)

Briscoe, C. (1995). *Silvicultura y manejo de teca, melina y pochote. Informe técnico 270*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/3975/Silvicultura_y_manejo_de_teca_melina_y_pochote.pdf?sequence=1

Canales-Ramírez, R. A. y Carrillo-Hernández, R. A. (2018). *Efecto de tres coberturas vegetales (viva, muerta, semicompostada) sobre las condiciones físicas, biológicas del suelo y manejo de malezas en el cultivo de papaya en el sector CNRA, Campus Agropecuario UNAN-León*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de Managua].

<http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/7237/1/242023.pdf>

Cañizares-Guilindro, B. F, y Villafuerte-Vargas M. A. (2021). *Geophila Macropoda Como Alternativa De Cobertura Vegetal En Plantaciones De Cacao (Theobroma Cacao L.)* [Tesis De Grado, Universidad Técnica De Cotopaxi]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7301>

Capurro, J. y Montico, S. (2020). Efecto de los cultivos de cobertura sobre las pérdidas de agua y suelo por erosión hídrica. *Cuadernos del Curiham*. 26(1). 41- 47.

<https://doi.org/10.35305/curiham.v26i0.147>

Castillo, L.E., Ruepert, C. & Solis E. (2000). Pesticide residues in the aquatic environment of banana plantation areas in the North Atlantic Zone of Costa Rica. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19(8), 1942-1950. <https://doi.org/10.1002/etc.5620190802>

Castillo-Mora, M. (2024). *Clasificación de las principales especies de flora arvense asociadas a plantaciones jóvenes de Tectona grandis L.f y Gmelina arborea Roxb en el Pacífico Sur de Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional, Costa Rica].

<https://hdl.handle.net/11056/29975>

Castro, F. y Raigosa, J. (2000). Crecimiento y propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis*) de 17 años de edad en San Joaquín de Abangares, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 24(2), 7-23. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/10037>

Chaves-Sanchez, E. Y. (2018). *Evaluación de tres métodos de siembra de Crotalaria spectabilis para su utilización como cobertura viva en siembras nuevas del cultivo de café (Coffea arabica)*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica].

<https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/fb1aa4fb-6dc2-44c9-bdc4-214690014436/content>

Chaves-Vazquez, M. A. (2017). *Comportamiento De Clones De Teca (Tectona Grandis Linn. F.) En Costa Rica Y Nicaragua*. [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

<https://hdl.handle.net/2238/9341>

Coll, L., Balandier, P. y Picon-Cochard, C. (2004). Morphological and physiological responses of beech (*Fagus sylvatica*) seedlings to grass-induced belowground competition. *Tree Physiology*. 24(1), 45–54. [10.1093/treephys/24.1.45](https://doi.org/10.1093/treephys/24.1.45)

Crespo-Alvarez, S. I. (2020). *Problemas causados por el mal uso de los herbicidas en el manejo del cultivo Caña de Azúcar (Saccharum officinarum) en la zona Lorenzo de Garaicoa, Guayas*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/8352>

Da Ponte Canova, E., y Salas, P. (2013). Control de malezas en plantaciones forestales con el uso de glyphosato y sulfato de amonio. *Investigación Agraria*, 11(1), 54–59.

<https://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/41>

Daza-Cruz, Y. X. (2020). *Apropiación humana de la producción primaria neta en sistemas de agricultura ecológica y convencional*. [Tesis de post grado, Universidad Nacional de Colombia].

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77670>

- De Camino, R. V; Alfaro, M. M. & Sage, L. F. M. (2002). *Teak (Tectona grandis) in Central America. Forest plantations working paper*. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Forestry department. https://www.researchgate.net/profile/Ronnie-De-Camino/publication/250310429_Teak_Tectona_grandis_in_Central_America/links/0deec51eb49179f34a000000/TEAK-Tectona-grandis-in-Central-America.pdf
- Dueñas-Cotrina, A.Y. (2021). *Efecto de diferentes porcentajes de harina de kudzu (Pueraria Phaseoloides) en la alimentación de cuyes (Cavia Porcellus) en la etapa de engorde*, 2020. [Tesis de grado, Universidad Nacional Hermilio Valdizan, Perú]. <https://hdl.handle.net/20.500.13080/7220>
- Fallas-Zúñiga, J. L. (2017). *Funciones alométricas, de volumen y de crecimiento para clones de teca (Tectona grandis L.f) en Costa Rica*. [Tesis de posgrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/2238/9240>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados*. <https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2021). *Cobertura vegetal del suelo*. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/in-practice/soil-organic-cover/es/>
- Fuentes-Molina, N., Varela-Martinez, D. A. y Garcia-Solano, D. (2023). Cultivos de cobertura como alternativa sostenible: análisis de *Pueraria phaseoloides* en suelos tropicales. *Información Tecnológica*, 34(1), 47-58. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642023000100047>

- Garau M. A., Ghera, C. M., Lemcoff, J. H. & Baran, J. J. (2004). Weeds in *Eucalyptus globulus* subsp. *maidenii* (F. Muell) establishment: effects of competition on sapling growth and survivorship. *New Forests*. 37(1), 251–264. [10.1007/s11056-008-9121-8](https://doi.org/10.1007/s11056-008-9121-8)
- García-Gutiérrez, C. y Rodríguez-Meza, G. A. (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa. *Ra Ximhai*, 8(3), (1-10).
<https://www.redalyc.org/pdf/461/46125177005.pdf>
- García-Jiménez, F. C. (2019). *Evaluación del establecimiento de cuatro leguminosas de cobertura, Vigna radiata, Pueraria phaseoloides L., Cajanus cajan Roxb, Mucuna pruriens L. en plantaciones de café (Coffea arabica L.) ubicadas en dos altitudes distintas*. [Tesis de grado, Universidad de Costa Rica]. <https://repositorio.una.edu.ni/2799/1/nh60a3672004.pdf>
- George, B. H. & Brennan, P. D. (2002). Herbicides are more cost-effective than alternative weed control methods for increasing early growth of *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus saligna*. *New Forests*. 24(1), 147–163. [10.1023/A:1021227913989](https://doi.org/10.1023/A:1021227913989)
- Gómez, M. y Reiche, C. (1998). *Costos de establecimiento y manejo de plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Costa Rica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/1000>
- Gómez-Gómez, R. y González-Lutz, M. I. (2018). Respuesta de cinco leguminosas de cobertura a la fertilización fosfórica. *Agronomía Mesoamericana*, 29(2), 293-303. [10.15517/ma.v29i2.27582](https://doi.org/10.15517/ma.v29i2.27582)
- Gómez-Pesantes, L. E. y Lara-Cedeño, R. G. (2016). *Efecto de cultivos de cobertura en el control de malezas, aporte de materia seca y la biodiversidad de artrópodos del suelo*. [Tesis de grado, Escuela Agrícola Panamericana].

<https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/6b012576-0b1f-45d1-94a9-9890296f236e/content> guzma

Guevara, M. (2011). Productividad y costos de la chapea mecanizada en plantaciones jóvenes de *Acacia mangium* en la zona norte de Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 8(20), 27-30.
<https://hdl.handle.net/2238/8236>

Gutierrez-Acuña, T. (2023). *Simposio Coberturas Vivas para el manejo de las malezas: Experiencias con coberturas nativas e introducidas en plantaciones de café*. Asociación Costarricense para el Estudio de las Malezas.

Guzmán-Plazola, P., Guevara-Gutiérrez, R.D., Olguín-López, J. L. y Mancilla-Villa, O. R. (2016). Perspectiva campesina, intoxicaciones por plaguicidas y uso de agroquímicos. *Idesia*, 34(3), 69-80.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016000300009>

Haro-Mora, K. D. y Vizcaino-Yepez, A. E. (2021). *Respuesta agronómica del cultivo de kudzu (Pueraria phaseoloides) y crotalaria (Crotalaria juncea) en el cantón La Maná recinto Selva Alegre*. [Tesis de grado, Universidad Técnica De Cotopaxi Extensión La Maná].
<http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7727>

Harper G. J., Comeau, P. G. & Biring, B. S. (2005). A comparison of herbicide and mulch mat treatment for reducing grass, herb and shrub competition in the BC interior Douglas-Fir Zone-Ten-Year results. *WJAF*. 20(3). 167-176. [10.1093/wjaf/20.3.167](https://doi.org/10.1093/wjaf/20.3.167)

Hecht, S. (1999). En Altieri, M. A. (Eds.), *AGROECOLOGÍA Bases científicas para una agricultura sustentable*. 1-325. <http://agroeco.org/wp-content/uploads/2010/10/Libro-Agroecologia.pdf>

Hernández-Rodríguez, P. (2017). *Efecto de diferentes métodos de control de arvenses en las propiedades del suelo, en plantaciones de teca, Tectona grandis (L.f.)*. [Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. <https://hdl.handle.net/2238/9398>

Hernández-Rodríguez, P., Esquivel-Segura, E. Guevara-Bonilla, M. y Briceño-Elizondo, E. (2018). Efecto del uso de cultivos de cobertura leguminosos en las propiedades del suelo en una plantación joven de *Tectona grandis* (L.f.). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/11074/utilizacion_cultivos_cobertura_al_ternativa_control.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Herrera-Mejía, F. (2025). *Determinación del área óptima de control de plantas competidoras en plantaciones forestales de Tectona grandis L.f., en Pocosal, San Carlos, Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional].

Instituto de Estadística y Censo. (2024). *Encuesta Nacional Agropecuaria 2021. Resultados generales de la actividad agrícola y forestal*. San José, Costa Rica.
<https://admin.inec.cr/sites/default/files/2022-09/reagropecENAAGR%C3%8DCOLA2021-01.pdf>

Jiménez-Velazco, J.J. (2015). *Evaluación de la intensidad y duración del control de malezas en una plantación comercial de eucalipto (Eucalyptus globulus Labill), de 0 a 1 año en la hacienda Santa María de Aglomerados Cotopaxi S.a, de la Parroquia Mulaló, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi*. [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
<https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4876>

Kogan, M., & Figueroa, R. (1999). Interferencia producida por las malezas durante los dos primeros años en pinus radiata D. Don. *Bosque*, 20(1), 57-64. <https://doi.org/10.4206/bosque.1999.v20n1-06>

Kremer, R. J., & Means, N. E. (2009). Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *European Journal of Agronomy*, 31(3), 153-161.

[10.1016/j.eja.2009.06.004](https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.06.004)

Ladrach, W. (2009). *Manejo de plantaciones de la teca para productos sólidos*. Sociedad Internacional de Forestales Tropicales. http://www.istf-bethesda.org/specialreports/teca_teak/teca.pdf

López, F. M., Duval, M., Martínez, J. M. y Galantini, J. A. (2018). *Propiedades físicas en suelos bajo siembra directa del sudoeste bonaerense. Compactaciones naturales y antrópicas en suelos argentinos*. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo.

https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/107364/CONICET_Digital_Nro.6b456860-9d0d-460d-8e47-2bbf2902cd5e_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

López-Rojas, M. (2019). *Evaluación de los efectos en la salud por el uso de plaguicidas en la agricultura de pequeños productores parcelarios del cantón de La Cruz, Guanacaste, Costa Rica*. [Tesis de grado, Universidad Técnica Nacional]. <https://repositorio.utn.ac.cr/handle/20.500.13077/337>

Martínez, H. (2015). *Teca (Tectona grandis L. f.): condiciones para su cultivo “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”*. Fondo Nacional de Financiamiento Forestal Forest Monitoring System for REDD+ Costa Rica.

Mayorga-Arial, D., Guillen-Mora, R. E. y Díaz-Romero, O. S. (2019). Uso de herbicida en el control de malezas. Importancia de su conocimiento para el profesional agrónomo. *Opuntia Brava*, 11(1), 204-210. <https://opuntiabrava.ult.edu.cu/index.php/opuntiabrava/article/view/712/700>

Mendoza-Dávalos, K., Sanabria-Quispe, S., Cosme De la Cruz, R., Quintanilla-Rosas, J., Duarte-Guardia, S. y Arone-Gaspar, G. (2021). Uso de coberturas vivas en un sistema de secano para conservar la

- humedad del suelo e incrementar el rendimiento de la quinua. *Manglar*, 18(4), 435-442.
<https://erp.untumbes.edu.pe/revistas/index.php/manglar/article/view/288/416>
- Mexzón, R. G., y Chinchilla M., C. (2003). Especies vegetales atrayentes de la entomofauna benéfica en plantaciones de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Costa Rica. *Palmas*, 24(1), 33–57.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/951>
- Meza-Picado, V., Alfaro-Jiménez, K., Bedoya-Arrieta, R., Romero-Mora, M., Valerio Madrigal, A. y Montenegro-Salas, P. (2019). *Reforestación comercial en Costa Rica, Regiones Huetar Atlántica, Huetar Norte y Chorotega. Heredia, Costa Rica.*
https://www.fonafifo.go.cr/media/2976/reforestacion_comercial.pdf
- Molina-Quesada, S., Alfaro, C., Murillo, O., Badilla, Y., y Luján, R. (2019). Evaluación del comportamiento de clones de *Tectona grandis* L. f. en suelos vertisoles de la Península de Nicoya, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 16(38), 24-34.
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-25042019000100024
- Molina-Segura, F. U. (2017). *Comportamiento De Clones De Teca (Tectona Grandis Linn.) A Los 4,5 Años En Upala, Zona Norte De Costa Rica.* [Tesis de grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica].
https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/9394/comportamiento_clones_teca_tectona_grandis.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Moná-Nieto, J. P., Cortés-Pedraza, S. B., y Hincapie-García, J. A. (2021). Impactos ambientales y efectos en la salud humana generados a partir del uso de glifosato. *CES Salud Pública*, 9(2), 36–50.
https://revistas.ces.edu.co/index.php/ces_salud_publica/article/view/5764

- Monje-Carvajal, J. J. (2011). La Agroecología: Un Marco de Referencia para Entender sus Procesos en la Investigación y la Praxis. *Revista Luna Azul*, 32(1), 128-134.
<https://www.redalyc.org/pdf/3217/321727234012.pdf>
- Montenegro, F., Kotman, F. y De Camino, R. (2013). *Tecnologías disponibles para el cultivo de teca. Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2854>
- Montoya-Macías, V. G. (2022). *Beneficios de las principales leguminosas como cobertura del suelo, en el cultivo de palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq)*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo]. <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/13363/E-UTB-FACIAG-AGROP-000021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mora, F. y Hernández, W. (2007). Estimación del volumen comercial por producto para rodales de teca en el Pacífico de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 31(1), 101-112.
https://www.mag.go.cr/rev_agr/v31n01_101.pdf
- Moya-Roque, R., Muñoz-Acosta, F. y Berrocal-Jiménez, A. (2010). Teca: *Tectona grandis* L.f. Verbenaceae. Ficha técnica 7. En Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas. R. Moya R. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 7(18-19), 117-131.
<https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/383/2355>
- Murillo, O., Wright, J., Monteuis, O. y Montenegro, F. (2013). *Mejoramiento genético de la teca en América Latina. Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 86-113.
<https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/2854>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *Los 10 elementos de la agroecología: Guía para la transición hacia sistemas alimentarios y agrícolas sostenibles*.

<https://www.fao.org/documents/card/es?details=I9037ES>

Orozco-Bundis, M. A. (2006). *Fomento de la agricultura sostenible mediante el establecimiento de un sistema de garantías de calidad en los procesos productivos y de comunicación a los consumidores. Aplicación a la agricultura mexicana*. [Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://www.tdx.cat/handle/10803/6842#page=1>

Pérez-Calderón, J. (2004). Agricultura ecológica: una alternativa al desarrollo sustentable en el campo mexicano. *El Cotidiano*, 20(127), 95-100. <https://www.redalyc.org/pdf/325/32512712.pdf>

Pozo-Lira, A., Alvarado-Aguayo, A., Carrera-Mariduaña, B. y Pilaloe-David, W. (2016). *Evaluación de distintas densidades de siembra de kudzu tropical (Pueraria phaseoloides) como alternativa de cobertura vegetal en plantaciones de cacao en la zona agrícola del cantón El Triunfo, provincia del Guayas*. [Tesis de grado, Universidad Agraria del Ecuador].
https://www.researchgate.net/publication/323905176_Evaluacion_de_distintas_densidades_de_siembra_de_kudzu_tropical_Pueraria_phaseoloides_como_alternativa_de_cobertura_vegetal_en_plantaciones_de_cacao_en_la_zona_agricola_del_canton_El_Triunfo_provincia

Proyecto de ley de 2023. Ley Para El Control Y Prohibición Del Uso De Plaguicidas Altamente Peligrosos Y Promoción De Una Agricultura Sostenible Y Amigable Con La Salud, El Ambiente Y Los Estándares Del Mercado Internacional De Alimentos. [Borrador No publicado].

Pulgar, J. (2013). *Uso de tres especies de leguminosas Centrosema macrocarpum Benth, Mucuna pruriens L., Pueraria phaseoloides para la recuperación de pasturas degradadas en el distrito de José*

Crespo y Castillo -Aucayacu. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva].

<http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/807>

Ramírez-Muñoz, F. (2021). El herbicida glifosato y sus alternativas. Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas. *Informe técnico 44*, 54.

https://ipen.org/sites/default/files/documents/serie_tecnica_44_glifosato_1_1.pdf

Ramírez-Muñoz, R., Bravo-Durán, V. y Herrera-Ledezma, G. (2017). Uso del herbicida glifosato en Costa Rica en el periodo 2007 a 2015. *Uniciencia*, 31(1), 59-72.

<https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/uniciencia/article/view/9045/10549>

Rosales, E. y Esqueda, V. (19 y 26 de noviembre, 2022). *Clasificación de los herbicidas por su modo de uso y mecanismo de acción*. XLIII Congreso Nacional de la Ciencia de la Maleza, México.

<https://somecima.com/wp-content/uploads/2022/12/MEMORIA-CURSO-ACTUALIZACION-2022.pdf>

Rosales-Mora, W. A. (2020). *Efecto de tres leguminosas sobre el control De arvenses, tipo y cantidad de macrofauna en Plantaciones de teca (Tectona grandis) de uno y dos años en la empresa Novelteak Costa Rica S.A, 2019*. [Tesis de grado, Universidad Internacional Antonio De Valdivieso Rivas – Nicaragua]. <http://repositorio.uniav.edu.ni/18/>

Serrano-Montero, R. y Moya-Roque, R. (2011). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 8(21), 1-12.

<https://revistas.tec.ac.cr/index.php/kuru/article/view/370/303>

Ticona-Delgado, E. R. (2019). *Estandarización Analítica de la Metodología de Bouyoucos para la Determinación Textural de Suelos del Altiplano Boliviano*. [Tesis De Grado, Universidad Mayor de

- San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/26828/T-2944.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Tirape-Hidalgo, G. (2022). *Beneficios de la Pueraria phaseoloides, como cobertura del suelo en el cultivo de Palma Aceitera (Elaeis guineensis) en el Ecuador*. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador]. <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13274>
- Ugalde-Alfaro, S. (2023). *Balanza comercial y principales tendencias de las exportaciones e importaciones de madera y muebles de madera en Costa Rica, estadísticas 2022*. Oficina Nacional Forestal. San José, Costa Rica. <https://onfcr.org/balanza-comercial-y-tendencias-de-las-exportacione-2>
- Valverde, E., Ortega, R., González, M. y Segura, R. (2023). *Simposio Coberturas Vivas para el manejo de las malezas: Coberturas vivas para mejorar la calidad y salud del suelo en el cultivo de banano*. Asociación Costarricense para el Estudio de las Malezas. <https://acorbartc.com/assets/doc/3.%20Manejo%20de%20suelos%20y%20Nutrición/3.8.%20ARTC2414.pdf>
- Vargas E. (2019). *Análisis de la estructura de producción agrícola de Costa Rica y la problemática ambiental asociada*. Dirección de Gestión de Calidad Ambiental de Costa Rica. <http://www.digeca.go.cr/documentos/analisis-de-la-estructura-de-produccion-agricola-de-costa-rica-y-laproblematika>
- Vargas-Castro, E. (2022). *Uso Aparente De Plaguicidas en la Agricultura de Costa Rica*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. https://d1qqtien6gys07.cloudfront.net/wp-content/uploads/2022/05/USO-APARENTE-DE-PLAGUICIDAS_MAY22_VF_PRINT.pdf
- Vázquez, R., Solís Oba, M. M., Rojas Serrano, C., Castro Rivera, R., Aguilar Benitez, G., Solis Oba, A., y Rappo Miguez, S. (2021). *Beneficios de las técnicas agroecológicas, una experiencia con mujeres*

de una comunidad rural en México. *Revista De Geografía Agrícola*, 67(1), 145–165.

<https://doi.org/10.5154/r.rga.2021.67.07>

Vignola, R., Watler, W., Poveda, K., Berrocal, A y Vargas, A. (2017). *Cultivo de palma aceitera en Costa Rica*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

<https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-8163.pdf>

Weaver, P. L. (2000). *Tectona grandis* L. f. teca. En Francis, J. K. y Lowe, C. A. Bio Ecología de Árboles Nativos y Exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales. Eds. Trabanino. 524-540.

https://data.fs.usda.gov/research/pubs/iitf/Bioecologia_gtr15.pdf#page=536

Yauri, C. J. (2019). *Uso de Tres Especies De Leguminosas Canavalia ensiformes, Centrosema macrocarpum, Pueraria phaseoloides en la Recuperación De Suelos Degradados en el Distrito de Luyando*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva].

Zaller, J. G., Heigl, F., Ruess, L., & Grabmaier, A. (2014). Glyphosate herbicide affects belowground interactions between earthworms and symbiotic mycorrhizal fungi in a model ecosystem.

Scientific reports, 4(1), 5634. <https://doi.org/10.1038/srep05634>

Zevallos-Vera, C. A. (2017). *Evaluación del mantenimiento de una plantación de teca (Tectona grandis) en Iñapari – MDD – Perú*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina].

<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3461/K10-Z4-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zobiole, L. H. S., Kremer, R. J., & de Oliveira Jr, R. S. (2011). *Glyphosate interactions with physiological, microbiological, and nutritional parameters in glyphosate-resistant soybeans*. Nova Scientific Publishers, Inc.

Anexos

Anexo 1. Suma de nematodos en 400 g de suelo a capacidad de campo por grupo trófico y genero previo y posterior a una aplicación de herbicidas sintéticos según área de control, asociados a plantaciones forestales de T. grandis en la finca Banderas, San Carlos de Costa Rica.

Grupo trófico	Género	Rodajas	Franjas de 1,2 m	Franjas de 2,4	Aplicación total
Previo a la aplicación					
Fitoparásito	<i>Diphtherophora</i>	10	7	1	10
	<i>Ditylenchus</i>	1			
	<i>Gracilacus</i>				11
	<i>Helicotylenchus</i>	588	834	619	618
	<i>Meloidogyne</i>	12	24		9
	<i>Mesocriconema</i>	68	101	168	62
	<i>Pratylenchus</i>	13		13	16
	<i>Psilenchus</i>	1	1	2	6
	<i>Tylenchus</i>	40	41	55	47
	<i>Xiphinematidae</i>	6			2
Micófago	N/D	9	28	9	5
Depredador	N/D	20	4	11	16
Bacteriofago	N/D	164	95	167	155
Suma		932	1135	1045	957
Posterior a la aplicación					
Fitoparásito	<i>Helicotylenchus</i>	1048	1526	1023	796
	<i>Meloidogyne</i>		5	14	6
	<i>Mesocriconema</i>	184	166	138	193
	<i>Pratylenchus</i>		12	3	39
	<i>Psilenchus</i>	13	1		10
	<i>Tylenchus</i>	61	60	85	85
	<i>Xiphinema</i>				
Micófago	N/D	7	12	24	26
Depredador	N/D	16	9	14	21
Bacteriofago	N/D	212	194	141	247
Suma		1541	1985	1442	1423

Anexo 2. Suma de nematodos 400 g de suelo a capacidad de campo por grupo trófico y genero previo y posterior a una aplicación de herbicidas sintéticos según área de control, asociados a plantaciones forestales de T. grandis en la finca San Cristóbal, San Carlos de Costa Rica.

Grupo trófico	Género	Rodajas	Franjas de 1,2 m	Franjas de 2,4	Aplicación total
Previo a la aplicación					
Fitoparásito	<i>Gracilacus</i>		7	2	
	<i>Helicotylenchus</i>	8	2		23
	<i>Meloidogyne</i>	11	20	24	4
	<i>Mesocriconema</i>	71	69	186	57
	<i>Pratylenchus</i>	10	3	6	2
	<i>Tylenchus</i>	76	134	99	53
	<i>Xiphinema</i>		4	12	
Depredador	N/D	27	41	54	29
Micófago	N/D	20	18	24	18
Bacteriofago	N/D	388	227	279	169
	Suma	611	525	686	355
Posterior a la aplicación					
Fitoparásito	<i>Helicotylenchus</i>	77	50	3	14
	<i>Meloidogyne</i>	35	3	23	66
	<i>Mesocriconema</i>	91	208	142	73
	<i>Pratylenchus</i>	8			2
	<i>Psilenchus</i>				3
	<i>Trichodorus</i>	4			
	<i>Tylenchus</i>	103	91	141	134
	<i>Xiphinema</i>	33	2	6	9
Depredador	N/D	38	14	27	5
Micófago	N/D	39	27	18	9
Bacteriofago	N/D	213	174	135	133
	Suma	641	569	495	448

Anexo 3. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento T1C (*Crotalaria juncea*) bloque I, II, III y IV.



Bloque I



Bloque II



Bloque III



Bloque IV

Anexo 4. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento T2P (*Pueraria phaseoloides*) bloque I, II, III y IV.



Bloque I



Bloque II



Bloque III



Bloque IV

Anexo 5. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento T3V (Vigna radiata) bloque I, II, III y IV.



Bloque I



Bloque II



Bloque III



Bloque IV

Anexo 6. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento T4P+C (*Crotalaria juncea* + *Pueraria phaseoloides*) bloque I, II, III y IV.



Bloque I



Bloque II



Bloque III



Bloque IV

Anexo 7. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento TV5VP+C (*Crotalaria juncea* + *Vigna radiata*) bloque I, II, III y IV.



Bloque I



Bloque II



Bloque III



Bloque IV

Anexo 8. Cromatograma de suelos en ensayo de coberturas vivas a los tres años, tratamiento

Testigo absoluto bloque I, II, III y IV.



Bloque I



Bloque II



Bloque III



Bloque IV

Anexo 9. Fotografía área del ensayo de densidad de *P. phaseoloides* a los seis meses de edad.

