

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**



TESIS

“Efectos del manejo forestal sostenible en la dinámica del carbono durante tres décadas, provincia Limón, Costa Rica”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE**

AUTOR:

Bach. GALVEZ CUSIQUISPE, Paty

ASESOR:

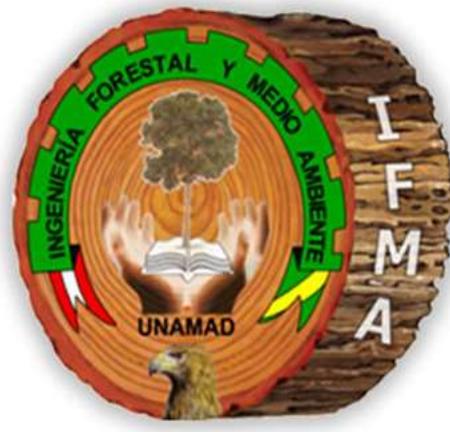
Ph.D. ZEVALLOS POLLITO, Percy Amilcar

CO-ASESOR:

Ph.D. FINEGAN, Bryan

Puerto Maldonado, noviembre 2024

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZÓNICA DE
MADRE DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL
Y MEDIO AMBIENTE**



TESIS

“Efectos del manejo forestal sostenible en la dinámica del carbono durante tres décadas, provincia Limón, Costa Rica”

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y
MEDIO AMBIENTE**

AUTOR:

Bach. GALVEZ CUSIQUISPE, Paty

ASESOR:

Ph.D. ZEVALLOS POLLITO, Percy Amilcar

CO-ASESOR:

Ph.D. FINEGAN, Bryan

Puerto Maldonado, noviembre 2024

DEDICATORIA

A Dios por guiarme y
brindarme la fortaleza a lo largo de mi vida.

Especialmente a mi
padre Cleto Galvez Huayllapuma
que me cuida desde el cielo,
a él le debo todo lo que soy
y que con seguridad
estará orgulloso y feliz
de este nuevo logro en mi vida.

A mi madre Martha Cusiquispe Abarca
y mis familiares
por ser mi motivo de superación
personal.

AGRADECIMIENTOS

Un enorme agradecimiento a mi Alma mater,
mis docentes y compañeros que me
acompañaron a culminar esta
etapa de mi vida.

A mis asesores Percy A. Zevallos Pollito y
Bryan Finegan por sus orientaciones en la
Ejecución y elaboración de esta
investigación.

A la catedra de Ecología del
Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE,
por brindarme la información.

A mis padres, hermanos y tíos
por confiar y alentarme a
culminar esta etapa de mi vida.

RESUMEN

Los criterios legales de la gestión de bosques en Costa Rica buscan planificar actividades ambientales que reduzcan emisiones de CO₂ y promuevan prácticas sostenibles con beneficios sociales, económicos y ambientales. Este estudio determinó los efectos que genera el manejo forestal en la dinámica de carbono aéreo, para el cual se determinó la contribución de la regeneración natural, árboles supervivientes y la mortalidad de árboles con datos de 30 años (1992-2021) de un bosque primario costarricense bajo distintos tratamientos de Aprovechamiento, Aprovechamiento con Tratamiento Silvicultural y sin intervención. Los resultados muestran que las actividades forestales aumentaron el carbono aéreo debido al crecimiento de árboles supervivientes, mientras que la mortalidad causó pérdidas inmediatas de carbono. Las áreas sin intervención también mostraron pérdidas significativas de carbono en ciertos periodos. Las prácticas de Aprovechamiento de Impacto Reducido y tratamientos silviculturales causaron fluctuaciones en la dinámica del carbono, con disminuciones iniciales seguidas de aumentos, y la regeneración reclutada incrementó el carbono aéreo a largo plazo, mientras que la mortalidad de árboles reflejó pérdidas, tanto por manejo forestal como por eventos naturales extremos.

Palabras claves: Manejo forestal sostenible, conservación, cambio climático, parámetros demográficos.

ABSTRACT

The legal criteria for forest management in Costa Rica are designed to plan environmental activities that reduce CO₂ emissions and promote sustainable practices with social, economic, and environmental benefits. This study evaluated the effects of forest management on the dynamics of aboveground carbon by analyzing the contributions of natural regeneration, surviving trees, and tree mortality over 30 years of data (1992-2021) from a primary Costa Rican forest under different treatments: Harvesting, Harvesting with Silvicultural Treatment, and No Intervention. The results show that forest activities increased aboveground carbon due to the growth of surviving trees, while tree mortality caused immediate carbon losses. Areas without intervention also experienced significant carbon losses during certain periods. Reduced Impact Logging practices and silvicultural treatments led to fluctuations in carbon dynamics, with initial decreases followed by increases, and recruited regeneration contributed to long-term carbon gains. Tree mortality, however, reflected losses from both forest management activities and extreme natural events.

Keywords: Sustainable forest management, conservation, climate change, demographic parameters.

TURNITIN_PATY GLAVEZ CUSIQUISPE

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.catie.ac.cr Fuente de Internet	2%
2	repositorio.unamad.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083 Fuente de Internet	1%
4	pmcarbono.org Fuente de Internet	<1%
5	Submitted to Universidad Nacional Amazonica de Madre de Dios Trabajo del estudiante	<1%
6	theses.whiterose.ac.uk Fuente de Internet	<1%
7	www.catie.ac.cr Fuente de Internet	<1%
8	orton.catie.ac.cr Fuente de Internet	<1%
9	suia.ambiente.gob.ec	

INTRODUCCION

El Panel Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático-IPCC (2023) considera que el manejo forestal sostenible es una de las estrategias innovadoras para la conservación y el aprovechamiento de los bienes y servicios de los bosques húmedos tropicales. Actualmente, uno de los objetivos principales de estas estrategias es reducir las emisiones de carbono en la atmósfera, responsables del aumento del calentamiento global. Costa Rica se ha destacado como un país referente en la generación de investigaciones en esta problemática global. Además, desde hace muchos años, ha implementado políticas que promueven la restauración, el manejo y la conservación de sus bosques, así como la expansión de las áreas de sus ecosistemas (MINAE 2022).

Actualmente, Costa Rica, es líder en la implementación de proyectos de conservación, que buscan hacer frente al calentamiento global, un problema de trascendencia mundial. Estos proyectos forman parte de las políticas verdes del país, y que alinean a los mecanismos de solución basadas en la naturaleza y con los objetivos de la REDD (Reducción de emisiones por Deforestación y Degradación); así dan cumplimiento, a convenios ambientales con otros países internacionales (Dirección de Cambio Climático 2019; 2020). Además, en 2017 las emisiones netas de carbono a la atmósfera del sector forestal en Costa Rica fueron nulas, ya que el país absorbió y compenso más carbono del que emitía, en comparación con otras actividades (IMN 2021).

Es importante resaltar que las emisiones de carbono provienen de la deforestación (Baccini et al. 2012), mientras las emisiones generadas por la degradación, por actividades no forestales han sido poco cuantificadas (Pearson et al. 2017). Igualmente, el calentamiento global al igual que la

extracción de madera afectan severamente la dinámica de los bosques (Mitchard 2018; IMN 2021), contribuyendo a la muerte de árboles, y por consiguiente la liberación de CO₂.

El manejo forestal sostenible, incluye tanto el aprovechamiento de impacto reducido (AIR) y la aplicación de tratamientos silvícolas, que puede influir en los flujos de carbono del bosque, sin que haya alteración de su ciclo natural (Putz et al. 2012; Martin et al. 2015). No obstante, las actividades forestales provocan la muerte de árboles grandes que generan emisiones significativas de CO₂ (Mazzei et al. 2010; Sist et al. 2014). Por otro lado, estas prácticas, igualmente favorecen al crecimiento de árboles que sobrevivieron y regeneración reclutada (Hu et al. 2020), que ayudan a la remoción del CO₂ de la atmosfera; sobre todo, con la aplicación de actividades silviculturales (Putz et al 2012). Por ello, los cambios en los flujos de CO₂ dependerán de la intensidad y la planificación con la cual se realicen las intervenciones forestales, si bien se requiere de mayores evidencias que respalden la contribución de estas experiencias sostenibles (Martin et al. 2015) y, que a menudo no se toman en cuenta en actividades de tala convencional.

En Costa Rica han logrado avances significativos para alcanzar la neutralidad de sus emisiones CO₂ (IMN 2021) y, continúa considerando, por la misma experiencia ganada por años, en las diferentes alternativas de integración de los aspectos sociales, económicos y ambientales (Snider et al. 2003). En este contexto, la conservación de los bosques, a través de prácticas adecuadas y oportunas para el manejo forestal, se convierte en una estrategia clave para crear ambientes adaptables y resilientes frente a la crisis climática global (Edwards et al. 2014; Griscom et al. 2020).

Consecuentemente, es de importancia la realización de estudios de evaluación de los cambios de la dinámica del ciclo del carbono (C) aéreo, considerando: mortalidad, reclutamiento y crecimiento de árboles supervivientes; así como la comprensión de la contribución de las diferentes formas de muerte en la pérdida de C aéreo. Por consiguiente, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar dichos parámetros en un bosque

manejado de una finca privada, en Costa Rica, a lo largo de treinta años, bajo tres tratamientos que describen en el presente trabajo como: Aprovechamiento (Ap), Aprovechado y tratamiento silvicultural (ApTS) y Testigo o sin intervención (T), utilizando datos de parcelas permanentes de muestreo (PPM). Este tipo de metodologías permite registrar y calcular con precisión los cambios en el bosque (Talbot et al. 2014).

ÍNDICE

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
INTRODUCCION.....	viii
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACION	1
1.1. Descripción del problema.....	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Variables.....	3
1.5. Operacionalización de variables	4
1.6. Hipótesis	5
1.7. Justificación	5
1.8. Consideraciones éticas	7
CAPITULO II: MARCO TEORICO	8
2.1. Antecedentes de estudio.....	8
2.3. Marco teórico	11
2.4. Definición de términos.....	16
CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	17
3.1. Tipo de estudio	17
3.2. Diseño del estudio	17
3.3. Población y muestra.....	18
3.4. Métodos y técnicas	19
3.5. Tratamiento de datos	24
CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	26
DISCUSION.....	37
CONCLUSIONES	44
SUGERENCIAS.....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
ANEXOS.....	55
Anexo 1. Matriz de operacionalización de variables	55
Anexo 2. Matriz de consistencia de proyecto de investigación	56
Anexo 3. Carta de compromiso para el uso de base de datos	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño de estudio del bosque primario manejado, Costa Rica. -	18
Figura 2. Mapa de ubicación del bosque primario manejado “Los laureles de Corinto”, Costa Rica.-----	20
Figura 3. Incremento anual de C aéreo de la regeneración reclutada en el bosque manejado, donde Ap= Aprovechamiento, ApTS= Aprovechamiento y tratamientos silviculturales, T=sin intervención y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas de la interacción tratamientos ^x periodos.-----	27
Figura 4. Incremento anual del C aéreo por el crecimiento de supervivientes en el bosque manejado, donde Ap= Aprovechamiento, ApTS= Aprovechamiento y tratamientos silviculturales, T=sin intervención y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas a lo largo de los periodos. -----	29
Figura 5. Incremento total del C aéreo en el bosque manejado, donde Ap= Aprovechamiento, ApTS= Aprovechamiento y tratamientos silviculturales, T=sin intervención y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas a lo largo de los periodos. -----	30
Figura 6. Medias de pérdida de C aéreo por la muerte de árboles en el bosque manejado, donde Ap= Aprovechamiento, ApTS= Aprovechamiento y tratamientos silviculturales, T=sin intervención y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas a lo largo de los periodos. -----	32
Figura 7. Medias de pérdida de carbono aéreo por diferentes condiciones de muerte, donde M1: Muerto en pie con ramas; M2: Muerto en el suelo quebrado o descopado; M3: Muerto desraizado; M4: Muerto por lianas o por caída de otro árbol; M5: Desconocido; M6: Aprovechamiento o tratamiento silvicultural -----	33
Figura 8. Medias del incremento del C aéreo- neto en un bosque manejado, letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos y años.	35

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Detalle de la Operacionalización de variables	4
Tabla 2. Años de evaluación seleccionados para las estimaciones	21
Tabla 3. Condiciones de muerte consideradas en el estudio	24
Tabla 4. Efecto de los tratamientos, periodos y la interacción tratamiento*periodos del incremento de C aéreo de reclutas, los valores de $p < 0.05$ indican diferencias estadísticamente significativas.....	26
Tabla 5. Efecto de los tratamientos, periodos, número total de árboles muertos y la interacción tratamiento*periodos del incremento por el crecimiento de supervivientes, los valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas.....	28
Tabla 6. Efecto de los tratamientos, periodos, y la interacción tratamiento*periodos del incremento total, los valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas.	29
Tabla 7. Efecto de los tratamientos, periodos, y la interacción tratamiento*periodos de la pérdida de C aéreo de la muerte de árboles, los valores de $p < 0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas.	31
Tabla 8. Efecto de los tratamientos, periodos, y la interacción tratamiento*periodos del cambio neto de C aéreo, los valores de $p < 0.05$ indican diferencias estadísticamente significativas.	34

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Descripción del problema

A nivel global, la deforestación y la degradación de los bosques a causa de cambios de uso del suelo por actividades de subsistencia e incendios están generando emisiones alarmantes de CO₂ en los últimos años (Grace, Mitchard y Gloor 2014; Curtis et al. 2018). A esto se suma las emisiones generadas por eventos meteorológicos extremos que cada vez son más frecuentes (Mitchard 2018).

Las actividades antrópicas y naturales alteran y perturban la geografía de los bosques; que conlleva a la pérdida de los servicios ecosistémicos que contribuyen directa e indirectamente en el flujo del carbono de los bosques (Poorter et al. 2015; Baccini et al. 2012). Además, las actividades del manejo forestal no planificado generan graves daños al bosque, que causa la muerte una mayor cantidad de árboles, daños en la estructura del bosque y daños a individuos remanentes, que también contribuyen a la emisión de CO₂ (Putz et al. 2012; Edwards et al. 2014; Martin et al. 2015; Pioniot et al. 2016).

Algunos estudios observaron que la tala convencional genera entre del 10% al 50% de emisiones de CO₂, especialmente si se aplica a intensidades de tala altas (Putz et al. 2012; Martin et al. 2015). Sin embargo, estas emisiones de CO₂ podrían recuperarse en un 100% en un periodo de 10 a 70 años dependiendo del daño inducido por el manejo forestal (West, Vidal y Putz 2014; Rutishauser et al. 2015; Pioniot et al. 2016). Incluso si se mejora la productividad forestal con la aplicación de tratamientos silviculturales, las emisiones de CO₂ serían mucho mayor y la remoción de CO₂ sería aún más prolongada (Roopsind et al. 2018).

Costa Rica, a pesar de sus grandes esfuerzos por frenar el cambio de uso del suelo, aún reportan la pérdida de bosques regenerados, pero en menor medida (Sierra, Cambroner y Vega 2016). Se estima que el 40% de sus emisiones de CO₂ generadas provienen de la degradación de sus bosques (Pearson et al. 2017), dato que resalta la importancia de implementar y reportar estrategias, puesto que estas emisiones no han sido reportadas (REDD+ 2021).

Este estudio de investigación, de acuerdo con sus objetivos busca contribuir al conocimiento científico de los efectos que genera el manejo forestal en los cambios de la dinámica de carbono en un área forestal productiva, y que sigue lineamientos forestales. El manejo forestal como estrategias de conservación reduce la presión del bosque y contribuye a la mitigación del cambio climático. El estudio abarca un periodo de evaluación de tres décadas, lo que permitió analizar las tendencias de la dinámica de carbono en un bosque manejado con diferentes niveles de tratamientos. Los tratamientos considerados para el estudio son Ap, ApTS y T. Estos han sido analizados con el objetivo de analizar la ganancia de carbono aéreo por reclutamiento y supervivientes, así como la pérdida por la muerte de árboles. Además, se busca verificar si la mayoría de las muertes de árboles ocurren por causas naturales.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. General

¿Cómo afecta el manejo forestal sostenible a la dinámica de carbono aéreo durante tres décadas?

1.2.2. Específicos

¿Cuál es la contribución del reclutamiento y crecimiento árboles supervivientes en la ganancia de carbono en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas?

¿Cuál es el aporte de la mortalidad de árboles, con la pérdida de carbono aéreo en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar los efectos del manejo forestal sostenible en la dinámica del carbono aéreo durante un período de tres décadas.

1.3.2. Objetivos específicos

- Calcular la contribución del reclutamiento y crecimiento de árboles supervivientes en la ganancia de carbono aéreo en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas.
- Determinar el aporte de la mortalidad de árboles en la pérdida de carbono aéreo en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas.

1.4. Variables

Independientes:

- Intervenciones forestales
- Tiempo

Dependiente:

- Ganancias de carbono aéreo
- Pérdida de carbono aéreo

1.5. Operacionalización de variables

Tabla 1.Detalle de la Operacionalización de variables

Variables	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente:			
Intervención forestal	Finegan (1992), las técnicas de manejo forestal influyen y facilitan el establecimiento, crecimiento, supervivencia y mortalidad de las especies forestales del bosque.	Tratamientos: - Aprovechado (Ap) - Aprovechado y tratado silviculturalmente (ApTS) - Testigo o sin intervención (T)	Individuos reclutas Individuos sobrevivientes Individuos muertos por aprovechamiento y perturbación natural
Tiempo	Es el tiempo donde se evaluó los tratamientos del bosque primario intervenido.	30 años (1992-2021)	Años intercensales: 1992-1993; 1993- 1996; 1996-1997; 1997-1998; 1998-2000; 2000-2006; 2006-2010; 2010-2021
Variable dependiente:			
Ganancia de carbono aéreo	Las acciones de perturbación de los bosques por deforestación y/o degradación, genera emisiones de carbono a la atmosfera (Mitchard 2018). El manejo forestal según la intensidad de perturbación que permite que continúe los procesos de la dinámica de carbono (Martin et al. 2015; Piponiot et al. 2016).	- Aprovechado (Ap) - Aprovechado y tratado silviculturalmente (ApTS) - Testigo o sin intervención (T)	Crecimiento de árboles supervivientes Reclutamiento Cambios netos
Pérdida de carbono aéreo			Mortalidad (pérdida) Diferentes condiciones de mortalidad

1.6. Hipótesis

1.6.1. General

- La dinámica del carbono aéreo en áreas con manejo forestal cambia a lo largo de tres décadas.

1.6.2. Específicos

- La ganancia de carbono por reclutamiento y crecimiento de supervivientes aumenta por el aprovechamiento y los tratamientos silviculturales respecto al tratamiento testigo a lo largo de las tres décadas.
- Las intervenciones de aprovechamiento y los tratamientos silviculturales no generan pérdida de carbono aéreo por mortalidad mayor a áreas sin intervención a lo largo de las tres décadas.

1.7. Justificación

Los bosques tropicales son grandes reservorios de carbono, lugar donde ocurre procesos naturales que, a causas de perturbaciones antrópicas y producto de los efectos del cambio climático, generan emisiones de CO₂ (Pearson et al. 2017; Mitchard 2018). Se ha destacado la importancia del manejo forestal sostenible para reducir las emisiones de CO₂, mediante la planificación y aplicación de herramientas de AIR y tratamientos silviculturales (Putz et al. 2008; 2012).

Es ampliamente reconocido que los bosques manejados sosteniblemente no solo mejoran y preservan la madera, sino también, conservan los servicios ecosistémicos (Putz et al. 2012; Edwards et al. 2014). No obstante, estos mecanismos son poco valorados debido a los altos costos de su implementación (Hu et al. 2020). Aun así, es crucial mejorar la comprensión de la dinámica de C aéreo en los bosques manejados (Sist et al. 2014), dado su capacidad de remover el CO₂ atmosférico (D'Oliveira et al. 2017).

La ganancias de C aéreo en el bosque se produce cuando se mejoran las condiciones de luz para el desarrollo de los árboles residuales y el ingreso de nuevos reclutas, aunque esto resulta en la muerte de algunos árboles

(Sist et al. 2014; Roopsind et al. 2018). Sin embargo, se debe tener en cuenta que la extracción de madera de muchos árboles grandes, puede generar un desequilibrio en el C aéreo neto (Mazzei et al. 2010). Adicionalmente, los cambios en las ganancias de C aéreo también dependen del desarrollo de especies pertenecientes a diferentes gremios ecológicos (San-José et al. 2021) y de sus características funcionales (Finegan et al 2015)

Si bien muchos estudios han investigado la biomasa y el carbono después de la extracción de madera, pocos se han centrado en los cambios en la dinámica del C aéreo durante periodos prolongados a causa del aprovechamiento de impacto reducido y tratamientos silvícolas (Hu et al. 2020), especialmente a los relacionados con la ganancia y pérdida de C aéreo por variables de crecimiento por supervivencia, reclutamiento y mortalidad. Comprender los cambios de la dinámica de C aéreo debido a perturbaciones del manejo forestal, evaluados en PPM, es fundamental para comprender el funcionamiento del bosque, desarrollar estrategias de conservación y abordar el cambio climático, así como para fortalecer el conocimiento de los tomadores de decisiones políticas (Mitchard 2018).

Finalmente, este estudio tiene como objetivo contribuir a la conservación de los bosques a través de soluciones basadas en la naturaleza (Griscom et al. 2020), como el manejo forestal sostenible. Además, presenta a este bosque como un modelo de aprovechamiento sostenible que cumple con las especificaciones de AIR, reguladas por la legislación forestal costarricense. Asimismo, se destaca como uno de los pocos estudios que evalúa los cambios en el C aéreo en un bosque manejado durante tres décadas. Los resultados de este estudio aportarán información relevante para las políticas y prácticas del manejo forestal de Costa Rica, así como posiblemente para las decisiones climáticas del país.

1.8. Consideraciones éticas

Este estudio sigue los lineamientos éticos, respetando los derechos de autor, de acuerdo con las normas de estilo establecidas por la Organización Internacional de Estandarización (Normas ISO) y como también de lo reglamentado para la elaboración de tesis de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD).

Así mismo, la presente investigación utilizó información proporcionada por la Cátedra de Ecología en el Manejo de Bosques Tropicales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Además, con los resultados adquiridos se podrán en conocimiento a los respectivos interesados.

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.2.1. Internacional

Un estudio en bosques tropicales manejados en Australia evaluó cuatro tratamientos forestales de diferente intensidad durante 48 años con relación a la recuperación de biomasa. Los tratamientos incluyeron tala selectiva como control, tala selectiva con aclareo de baja, media y alta intensidad. La recuperación de biomasa fue lenta debido al crecimiento de árboles remanentes. Luego, la biomasa aumentó linealmente, pero en tratamientos intensos este incremento disminuyó con el tiempo. Las actividades con aclareo mostraron mayor recuperación de biomasa comparadas al control, debido al reclutamiento y crecimiento de árboles. A mayor intensidad de tratamiento más mortalidad de árboles, afectando la recuperación de biomasa y extendiendo el tiempo (Hu et al. 2020).

En un bosque tropical talado en Vietnam, evaluaron el crecimiento de la biomasa, la mortalidad y la ganancia neta de biomasa aérea (AGB) por especie durante 30 años y relacionaron con la densidad de madera (DM). A nivel poblacional, registraron una ganancia neta de AGB de $6,47 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, resultado de un crecimiento de AGB de $8,30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, un reclutamiento de AGB de $0,67 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y una pérdida de AGB por mortalidad de $2,50 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. A nivel de especies, la DM tenía una relación negativa con la mortalidad y el crecimiento, pero una relación positiva con la ganancia de AGB por reclutamiento. Destacaron que las especies con alta densidad de madera contribuyen más a la ganancia de AGB que las de baja densidad de madera (Nam, Anten y van Kuijk 2018).

En un bosque tropical del Escudo de Guayana, (Roopsind et al. 2018) evaluaron la recuperación de madera y carbono aéreo Para el estudio,

utilizaron un modelo de regresión de punto de corte para estimar la mortalidad post-tala, lo que permitió predecir la recuperación de madera y carbono aéreo. El crecimiento de árboles remanentes fue crucial para esta recuperación, mientras el tratamiento silvícola de liberación mejora la recuperación de madera, pero tuvo un impacto negativo en las reservas de carbono. A pesar del aporte del reclutamiento y crecimiento de árboles sobrevivientes, no se logra recuperar la pérdida de carbono aéreo. El análisis del punto de corte demuestra la influencia de la mortalidad inicial y la intensidad del AIR en la recuperación de carbono aéreo.

En los bosques de la Amazonía oriental en Paragominas, Brasil, evaluaron la dinámica de especies de bosques manejados con diferentes niveles de perturbación durante 2002 – 2013. Sus objetivos se centraron en evaluar el crecimiento, reclutamiento y mortalidad de un bosque sin aprovechamiento y bosques de 04 niveles de perturbación de 100 hectáreas. Evidenciaron que las altas tasas de mortalidad disminuyeron prolongadamente a partir del quinto año, mientras el reclutamiento y crecimiento aumentaron para todas las especies sin importar sus características ecológicas. Además, los bosques con aprovechamiento aumentaron el crecimiento de sobrevivientes en áreas con intensidades bajas de intervención (Dionisio, Luiz Fernandes Silva et al. 2018).

En los bosques de la cuenca del Amazonas y del escudo de Guayana, Pioniot et al. (2016), analizaron datos de 133 parcelas permanentes para investigar la relación entre temperatura, precipitación y tipo de suelo con los flujos de carbono y la recuperación de carbono. Después de 10 años, encontraron que la ganancia de C en el escudo de Guayana fue de 21 Mg C ha⁻¹, lo cual fue mayor que lo registrado en la cuenca del Amazonas, donde las precipitaciones suelen ser más bajas. Estos autores destacan el papel crucial que juega el crecimiento de los árboles sobrevivientes en la recuperación de carbono en áreas perturbadas por la extracción de madera.

En los bosques de toda la Amazonia, Espírito-Santo et al. (2014), caracterizaron los eventos de perturbación a diferentes escalas en bosques primarios, combinando metodologías de parcelas, tecnología LIDAR y

teledetección. Encontraron que la pérdida de carbono por mortalidad a una perturbación pequeña es de 1,7 petagramos de carbono (Pg C) por año, mientras a una escala media pierde 0,01 Pg C año⁻¹ y a una escala mayor pierde ~0,003 Pg C año⁻¹. Además, los análisis revelaron que la pérdida de carbono por perturbación media y alta son compensadas por la ganancia neta del crecimiento de árboles sobrevivientes.

En un bosque lluvioso de Paragominas, Brasil, Sist et al. (2014) evaluaron el efecto en la dinámica de biomasa aérea (AGB) ocasionado por el aprovechamiento de impacto reducido (AIR). La metodología consistió en determinar la AGB del crecimiento y supervivencia de árboles de tres clases diamétricas (20-40, 40-60 y ≥ 60 cm DAP). La mortalidad de árboles grandes, 8 años posterior a las actividades de extracción afectó en gran proporción a los cambios netos de AGB, incluso estos valores fueron mayores a las ganancias de AGB que aporta los árboles de menor diámetro. Al año del AIR, las pérdidas de AGB por árboles grandes representaron el 40%. Concluyeron que resulta importante reducir la intensidad de la extracción para evitar generar un gran impacto en la dinámica de la AGB.

En un bosque lluvioso de Pará, Paragominas, Brasil, (Mazzei et al. (2010). compararon los cambios en la biomasa aérea (AGB) generados por el AIR durante 2004-2008 con diferentes niveles de perturbación. El primer año después de la tala, observaron una disminución del 23% en la AGB con respecto al valor inicial de 410 Mg ha⁻¹ (100%). Las pérdidas de AGB fueron debido a la extracción de árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 55 cm en 73%. El cambio neto de AGB después de la extracción se mantuvo negativo (-31,1 Mg ha⁻¹ año), debido a la continua mortalidad de los árboles remanentes. A los tres años, la recuperación de AGB fue impulsada por el crecimiento de árboles viejos, mientras el reclutamiento no contribuyó significativamente a la recuperación de la AGB. Asimismo, destacan la importancia de reducir la intensidad del aprovechamiento si se busca recuperar la AGB, aunque esto implique disminuir los ingresos económicos.

2.2.2. Nacional

En bosques húmedos tropicales de Bolivia, Brasil y Costa Rica, estudiaron la relación de diversidad funcional y el almacenamiento y la captura de carbono (Finegan et al., 2015). De ello, estimaron la biomasa inicial y los incrementos de biomasa, y se relacionaron estos incrementos con las medias ponderadas de ocho rasgos funcionales e índices de diversidad funcional. Los resultados mostraron que la media ponderada de los rasgos funcionales del área foliar específica, el contenido de nitrógeno en las hojas, la resistencia foliar, la altura máxima de los árboles adultos y la densidad de madera son buenos predictores para ambas variables de biomasa. Además, encontraron que el rasgo de altura máxima es un predictor destacado para el almacenamiento de biomasa, mientras que el área foliar específica incrementa la captura de carbono (Finegan et al., 2015).

En la finca La Tirimbina en Costa Rica, Finegan y Camacho (1999), evaluaron los cambios en la dinámica del bosque en áreas con tratamientos silviculturales y extracción de madera. Las prácticas se realizaron entre 1989 y 1990, donde aplicaron tratamientos de liberación/refinamiento y regeneración con retención, utilizando parcelas aprovechadas como control. Los tratamientos provocaron una disminución en el área basal del bosque, y aumentaron la mortalidad poco después de las intervenciones. En los años posteriores, todos los tratamientos mostraron un aumento en las tasas de reclutamiento, y la tasa de crecimiento por supervivencia se vio beneficiada por las prácticas silvícolas. Estos resultados demuestran la importancia de las prácticas del manejo forestal y la consideración de la dinámica del bosque.

2.3. Marco teórico

2.3.1. Emisiones de CO₂ en bosques tropicales y Cambio climático

El cambio climático es una realidad latente, ocasionado por las emisiones de CO₂ por deforestación y degradación de los bosques (Mitchard 2018; IPCC 2023) desde la era industrial hasta la actualidad (IPCC 2023). Estos eventos

tienen repercusiones tanto positivas como negativas en la captura de carbono en diversos ecosistemas (Pearson et al. 2017; Mitchard 2018).

Según Xu et al. (2021), entre 2000 y 2019 en promedio se ha emitido carbono entre 4,9 a 5,5 petagramos de carbono (Pg C) año⁻¹ a la atmósfera. Por otro lado, Harris et al. (2021), evidencia que entre 2001 y 2019 las emisiones fueron de $8,1 \pm 2,5$ gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente (GtCO_{2e} año⁻¹). Mientras entre el 2015 – 2019 las emisiones del carbono aéreo fueron de aproximadamente el 72 %, lo que muestra una disminución mínima en comparación con los valores emitidos entre 2001 y 2005 (73%) (Feng et al. 2022).

La IPCC (2023) describe la situación que provocó el incremento de emisiones de carbono a la atmósfera hasta el 2020, y que generó el incremento de temperatura a 1,2 °C. Estas han generado precipitaciones y sequías extremas continuas que afecto a los bosques, océanos, actividades de producción alimentaria y la economía. Específicamente en los bosques, las altas temperaturas podrían alterar los procesos de fotosíntesis (Huang et al. 2019) y, por lo tanto, el ciclo del carbono. También está documentado que los bosques pueden desarrollar resiliencia ante las repercusiones del cambio climático, pero al mismo tiempo amplificar los efectos del calentamiento global (Kirilenko y Sedjo 2007; IPCC 2023).

2.3.2. Bosques gestionados sosteniblemente y su influencia en la reducción de emisiones de CO₂

Los bosques manejados han sido reconocidos como fuente de gran valor ecológico (Putz et al. 2012; Martin et al. 2015; Morrison et al. 2021). A nivel global, se han considerado los bosques como una forma de obtener ingresos económicos y mejoras sociales (Köhl et al. 2015). Países con bosques tropicales, han implementado mecanismos de extracción de madera convencionales (Blaser y Zabel 2016). Sin embargo, debido a la insostenibilidad de estos métodos, ha surgido la necesidad de implementación de una gestión forestal que no dañe los bosques

remanentes al extraer productos maderables y que sea amigable con el ambiente (Putz et al. 2012; FAO 2020).

Los bosques manejados mediante prácticas como el aprovechamiento de impacto reducido (AIR) y tratamientos silviculturales han demostrado tener cierta resiliencia frente a eventos del cambio climático en comparación con bosques sin manejo (Kirilenko y Sedjo 2007). Además, estas prácticas mejoraron la captura y almacenamiento de carbono en cierto grado (Martin et al. 2015). De esta manera, los bosques evitan y reducen las emisiones de CO₂ atmosférico generadas por los cambios de uso de suelo (Fahey et al. 2010).

2.3.3. Dinámica del carbono en bosques manejados

Los bosques son los ecosistemas más dinámicos en cuanto al ciclo del carbono (Fahey et al. 2010), siendo influenciados por factores climáticos (Kirilenko y Sedjo 2007; De Meira Junior et al. 2020), como por perturbaciones antrópicas (Mitchard 2018). El CO₂ se almacena en la biomasa viva de los árboles a través del proceso de fotosíntesis (Bellassen y Luysaert 2014). Este proceso es esencial, ya que contribuye al desarrollo de la biodiversidad de los bosques y a la regulación del clima (Griscom et al. 2020)

Para entender la dinámica del C aéreo, es necesario entender los procesos de mortalidad, reclutamiento y crecimiento por supervivencia. En general, el crecimiento y el reclutamiento de árboles conducen a una acumulación de carbono, mientras que la mortalidad genera pérdidas de carbono (Mazzei et al. 2010; San-José et al. 2021). La mortalidad es influenciada por factores internos y/o externos que afectan los bosques (De Meira Junior et al. 2020; San-José et al. 2021). Específicamente, el manejo forestal puede influir en el ciclo del carbono, ya que una intensidad mayor de extracción de madera; conlleva a una mayor mortalidad de árboles (Mazzei et al. 2010). Además, el cambio climático también promueve la mortalidad de árboles viejos, (De Meira Junior et al. 2020).

Por otro lado, las ganancias de carbono por crecimiento y el ingreso de nuevos individuos se deben a varios factores que propician el desarrollo de los árboles en el bosque. Según Mazzei et al. (2010) el reclutamiento de árboles >10 cm DAP probablemente contribuye significativamente a la acumulación de carbono, años después de implementar mecanismos de manejo forestal, mientras que el crecimiento de los árboles es una variable que aporta considerablemente en el flujo del carbono durante los primeros años. Sin embargo, es importante que esto esté basado en una planificación de AIR, lo que permitiría un mayor ingreso de luz al bosque, mejorando las condiciones para el crecimiento de los árboles y para aquellos individuos que aún no alcanzan los 10 cm DAP (Dionisio et al. 2018), asegurando así las reservas de carbono.

2.3.4. Iniciativas de conservación para reducir las emisiones de carbono en la atmosfera en Costa Rica

Costa Rica ha estado incorporando iniciativas de conservación, desde los 1990, para detener la deforestación y reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en todos sus sectores, con el objetivo de cumplir con sus compromisos internacionales y lograr la estabilidad climática (Secretaría REDD+ 2018).

Un ejemplo claro de esto es la implementación de pago por servicios ambientales (PSA) (Sánchez-Azofeifa et al. 2007; Wallbott, Siciliano y Lederer 2019), Aunque su objetivo institucional es la conservación de servicios ecosistémicos y detención de la deforestación, en el pasado no logró reducir la deforestación en su totalidad en el ámbito de su aplicación de fincas privadas (Sanchez-Azofeifa et al. 2007). A pesar de todos los inconvenientes, ha sido un antecedente exitoso de conservación y actualmente cuenta con el respaldo de propietarios de fincas privadas (Wallbott, Siciliano y Lederer 2019).

Otro programa ampliamente conocido a nivel global es la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques (REDD+), que involucra la participación de la población en la gestión de actividades

económicas. Costa Rica no es ajena a este tipo de programas, puesto que desde años atrás vienen implementado este tipo de instrumentos (Corbera et al. 2011), buscando la neutralidad de sus emisiones de carbono mediante políticas que favorecen su economía (Secretaría REDD+ 2018). Un ejemplo de su éxito es el reconocimiento de sus reducciones de emisiones históricas, lo que llevó que en 2020 recibieran 54,1 millones de dólares por conservar sus bosques a través del proyecto Pagos por Resultados (REDDCOSTARICA 2023).

Además, se realizaron modificaciones en la ley forestal bajo criterios de sostenibilidad, lo que permitió la protección de los bosques privados y públicos. Estos criterios incluyeron la implementación de técnicas innovadoras en el aprovechamiento planificado de madera y la aplicación de tratamientos silviculturales para mejorar la productividad maderable (Decreto Ejecutivo 34559). También se prohibió la extracción de productos forestales en áreas susceptibles, como pendientes y cercanas a reservas hidrográficas, lo cual debe estar contemplado en un plan de manejo forestal acreditado y fiscalizado por un regente forestal.

El manejo sostenible de los bosques costarricenses promueve la conservación de los servicios ecosistémicos, y estos puntos están detallados en todos sus planes estratégicos para combatir el cambio climático, enfatizando que son mecanismos de solución basados en la naturaleza y que cumplen con los objetivos de desarrollo sostenible (Secretaría REDD+ 2018; Dirección de Cambio Climático 2019; 2020).

Finalmente, la administración de los bosques a través de áreas naturales protegidas y la implementación de políticas verdes han permitido frenar la deforestación. Gracias a la protección de sus bosques, la mayor parte de ellos se han convertido en sumideros netos de carbono, incluyendo también los bosques prístinos, de difícil acceso (Sanchez-Azofeifa et al. 2007).

2.4. Definición de términos

Dióxido de carbono: Elemento químico fundamental que hace parte de la composición de los seres vivos. Este componente se almacena y absorbe carbono de la atmosfera en diferentes componentes de la tierra, así como los bosques que capturan carbono a través de los procesos de fotosíntesis (Thomas y Martin 2012).

Cambio climático: Cambios a largo plazo de los eventos climatológicos producto de actividades antrópicas históricas y de eventos naturales (IPCC 2023).

Soluciones basadas en la naturaleza: Estrategias que contemplan lineamientos de administración sostenible de los bosques, a favor de la humanidad y los ecosistemas (Griscom et al. 2020).

Parcelas permanentes de muestreo: Superficie donde se define los límites y puntos exactos, así como las especies que la conforman. Cada parcela se evalúa por observaciones periódicas, con la finalidad de obtener la mayor cantidad de datos (Talbot et al. 2014).

Diámetro a la altura del pecho (DAP): Es la medición del diámetro de los árboles a una altura de 1.30 metros desde la base del árbol.

Ecuación alométrica: Ecuación matemática que determina o explica las relaciones entre los atributos biológicos de un individuo (Réjou-Méchain et al. 2017).

Resiliencia: Es la capacidad de adaptarse o recuperarse después de perturbaciones producto de perturbaciones naturales como eventos meteorológicos extremos y antrópicas (FAO 2020).

Dinámica de carbono: Es el proceso donde da origen el ciclo de carbono, este proceso se da por la salida y el ingreso constante de carbono considerados como los procesos de flujos y reservas de carbono (Piponiot et al. 2016).

CAPITULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

3.1. Tipo de estudio

Este estudio fue una investigación de tipo experimental y comparativa (Hernández-Sampieri y Mendoza 2020), específicamente se analizó una base de datos de PPM, de vegetación que fueron medidas y monitoreadas antes y después; de la extracción de madera y la aplicación de tratamientos silviculturales durante treinta años (Figura 1).

3.2. Diseño del estudio

Este estudio siguió una línea de investigación del campo y experimental (Hernández-Sampieri y Mendoza 2020), partiendo de datos recopilados de un experimento donde se manipularon las variables de prácticas de manejo forestal para medir los aspectos ecológicos de un bosque primario intervenido. Específicamente se analizó una base de datos de PPM, de vegetación que fueron medidas y monitoreadas antes y después; además de la extracción de madera y la aplicación de tratamientos silviculturales durante un tiempo de treinta años (Figura 1).

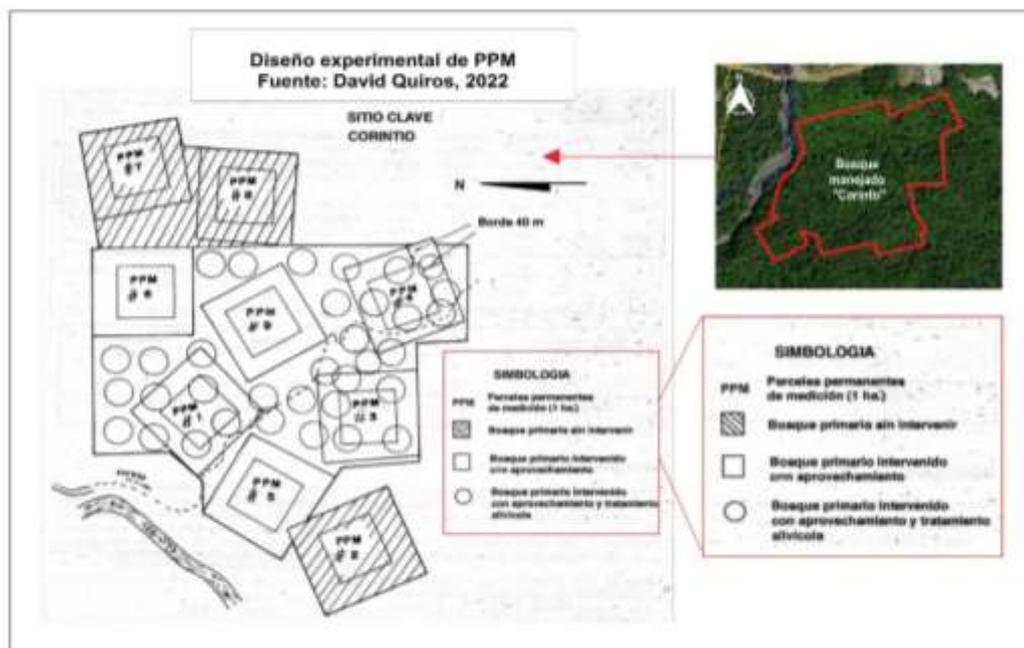


Figura 1. Diseño de estudio del bosque primario manejado, Costa Rica.

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

El área de estudio abarcó 191 hectáreas (ha), donde se aplicaron tres tratamientos con diferentes niveles de intervención forestal: tratamiento aprovechado (Ap, tres parcelas de 1 ha), tratamiento aprovechado y tratado silviculturalmente (ApTS, tres parcelas de 1 ha) y tratamiento testigo o sin intervención (T, tres parcelas de 1 ha).

El monitoreo de las parcelas permanentes de muestreo (PPM) se llevó a cabo desde 1989 hasta 2021. En 1992, se implementó por primera vez el Plan de Manejo Forestal (PMF), y en el mismo año, se realizó una extracción de madera con una intensidad media de 7 ind/ha ≥ 60 cm dap. En 1996, en tres de las parcelas del tratamiento Ap, se aplicaron tratamientos silviculturales de liberación y refinamiento, alcanzando una densidad de 39 ind/ha > 10 cm dap eliminados. Estas parcelas en esta investigación fueron designadas como ApTS y en su mayoría eliminaron individuos de *Pentaclethra macroloba* (Willd.) Kuntze con mala forma y de bajo potencial productivo (Morrison et al. 2022). En el año 2021, se ingresó por segunda

vez para extraer madera a una intensidad baja (4 ind/ha) con un volumen promedio de 16 m³ ind/ha en un área de 114 ha.

3.3.2. Muestra

La investigación tiene un tipo de muestreo no probabilístico que consta de nueve PPM: tres parcelas de Ap, tres parcelas de ApTS y tres parcelas de T. La evaluación de la vegetación de este bosque inició en 1988 (Finegan et al. 1998), dentro de parcelas de 1 ha (100 x 100 m) subdivididas en subparcelas de 20 m x 20 m. Además, la información recopilada durante los periodos de monitoreo incluyó la evaluación de árboles y palmas \geq a 10 cm DAP y que fueron identificadas por especialista en botánico.

3.4. Métodos y técnicas

3.4.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a un bosque primario manejado, situado en el cantón Pococí, provincia de Limón, Costa Rica (10°12' N, 83°52' O) (Figura 1). El área en cuestión es de propiedad privada y presenta una ecología de bosque muy húmedo tropical (bmh-T), según la clasificación de Holdridge (1982). Según Finegan et al. (2015), la vegetación este bosque esta mayormente compuesta por las especies *Pentaclethra macroloba* (Willd.) Kuntze e *Iriartea deltoidea* Ruiz & Pav., ubicadas a una altura que oscila entre 235–350 m.s.n.m. Además, la provincia experimenta un clima con temperatura promedio anual de 24 °C y precipitaciones anuales aproximadas de 3600 mm.

El bosque primario manejado conocido como Los laureles de Corinto, ubicado en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central (ACCV), tiene un historial de perturbación de extracción de madera desde 1992, siguiendo los criterios de AIR estipulados en la ley forestal costarricense (Carrera 1993; Camacho 2020).

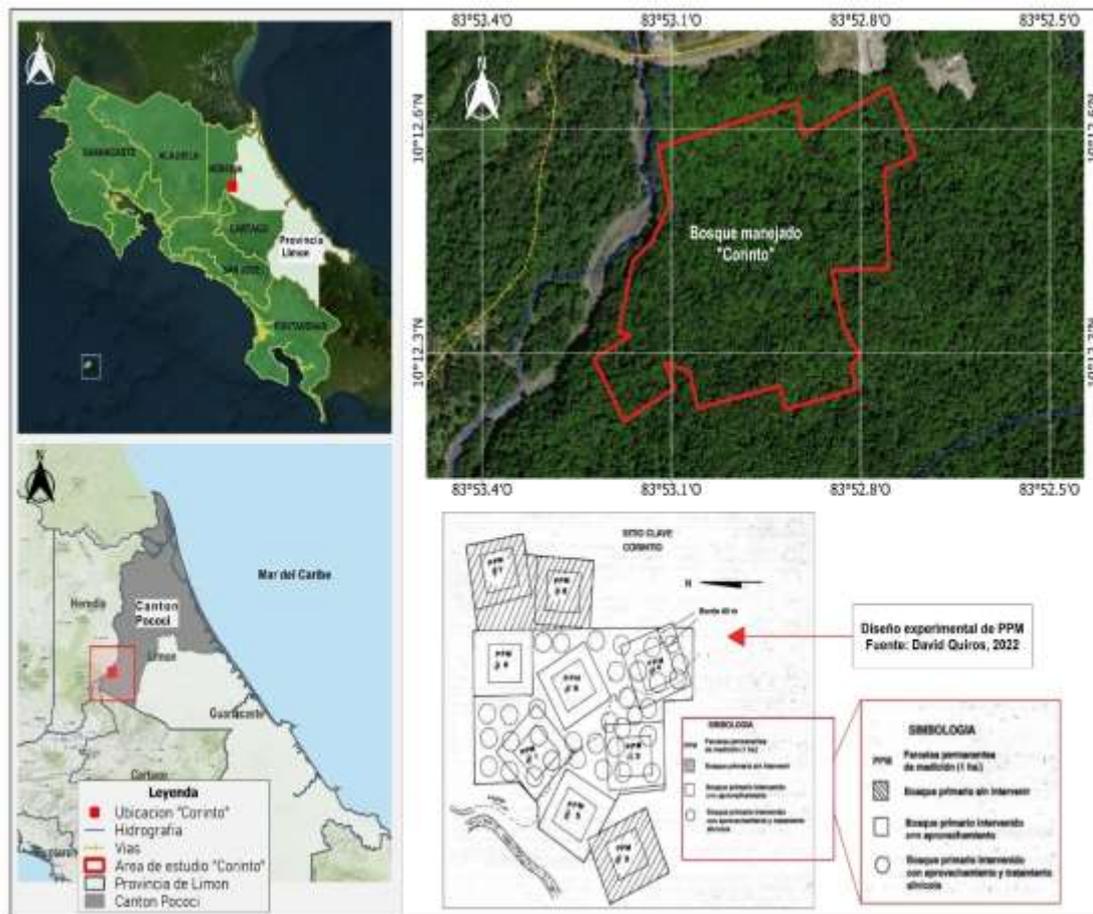


Figura 2. Mapa de ubicación del bosque primario manejado “Los laureles de Corinto”, Costa Rica.

3.4.3. Estimación de biomasa aérea (AGB)

Antes de las estimaciones de AGB, se revisaron y seleccionaron las variables de la base de datos proporcionada por la Unidad de Ecología en el Manejo de Bosques Tropicales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Se verificaron los años de evaluación (Tabla 1) en cada parcela y tratamiento, que permitió la selección de nueve años con registros completos de variables como coordenadas geográficas, forma de vida, familia, género, especie, número de parcela, identificación de árbol, DAP, punto de medición (POM), estado (vivo o muerto) y condición de muerte.

Tabla 2. Años de evaluación seleccionados para las estimaciones

Tratamiento	Parcelas	Años de evaluación
Ap	5,6 y 9	1992: Año donde realizaron la primera medición (enero) y posterior la extracción de madera. 1993: Año del registro y medición de árboles reclutas, supervivientes y muertos (Impacto del AIR).
ApTs	1,3 y 4	1996: Año de aplicación de tratamientos silviculturales, 1997: Año del registro y medición de árboles reclutas, supervivientes y muertos (Impacto silviculturales)
T	2,7 y 8	1998: Año del registro y medición de árboles reclutas, supervivientes y muertos (Impacto silviculturales) 2000;2006;2010: Año del registro y medición de árboles reclutas, supervivientes y muertos 2021: Año de la segunda extracción de madera.

Ap= Aprovechado; ApTS=Aprovechado y tratado silviculturalmente y T= Testigo

La consistencia de los datos fue verificada con Rstudio, esto incluyó la corrección de los nombres taxonómicos mediante el servicio de Resolución de Nombres Taxonómicos (TNRS en sus siglas en inglés) con la función *correctTaxo* del paquete BIOMASS (Réjou-Méchain et al. 2017). Además, fueron ajustadas las mediciones de DAP con la función *correct_size* del paquete ForestData, para corregir mediciones inusuales. Para aquellos árboles que registraron cambios en el POM desde el inicio del monitoreo, se mantuvo el valor original registrado debido que fueron pocos los registros observados. La función *Correct_size*, fue diseñada para corregir errores o cambios en las mediciones diamétricas de inventarios forestales, detectando incrementos de DAP de ≥ 50 mm y disminución de DAP ≥ 2 mm, que fueron considerados inusuales, aunque, para especies pioneras fueron aceptadas sus incrementos hasta 80 mm como normales (Nino Page, 2024).

Finalmente, se estimó la biomasa (AGB) por el paquete BIOMASS (Réjou-Méchain et al. 2017). Este paquete emplea el modelo alométrico propuesto y ajustado por Chave et al. (2014), que de acuerdo con la información es recomendable considerar el modelo que incluye el diámetro a la altura del pecho (DAP), la densidad de madera (DM) y el estrés climático (E) (Ec. 1).

$$AGB = \exp(-0.024 - 0.896 \times E + 0.920 \times \ln(DM) + 2.795 \times \ln(DAP) - 0.0461 \times [\ln(DAP)]^2) \quad (\text{Ec.1})$$

La variable estrés climático fue estimada utilizando las coordenadas geográficas de estudio junto con datos de precipitación, sequía y temperatura incorporados en el paquete. Mientras la densidad de madera fue obtenida del paquete BIOMASS mediante la función `getWoodDensity`, que toma valores de una base de datos global y promedia de acuerdo con nomenclatura taxonómica, para aquellos árboles que no se identificó taxonómicamente.

Para la estimación de AGB, aérea de palmas, se utilizó la ecuación de Goodman et al. (2013), específicamente la ecuación diseñada para datos de inventarios donde no se incluyeron mediciones de altura (Ec. 2). Esto debido a que las palmas son especies que tienen desarrollo ecológico muy diferente a los árboles, donde algunos crecen en altura, y otros aumentan el diámetro de sus estípites (troncos) hasta alcanzar su máximo crecimiento.

$$AGB = \exp(-3.3488 + (2.7483 \times \ln(DAP))) \quad (\text{Ec.2})$$

3.4.4. Estimación de C aéreo

El C aéreo se estimó para cada individuo arbóreo de cada tratamiento presente en la base de datos. Se utilizó el factor de conversión de 0,471 que es la fracción de AGB recomendada por Réjou-Méchain et al. (2017), este método sigue el enfoque adoptado por Thomas y Martin (2012), quienes conducen sus análisis según los valores propuestos por el IPCC.

3.4.5. Dinámica de C aéreo

Se estimó la dinámica de C aéreo de ocho periodos, con intervalos de 1 a 11 años para los tres tratamientos, abarcando los periodos 1992-1993, 1993-

1996, 1996-1997, 1997-1998, 1998-2006, 2000-2006, 2006-2010 y 2010-2021, utilizando la metodología de Prado-Junior et al. (2016) y Finegan et al. (2015).

Ganancia de C aéreo por reclutas ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$): Se determinó a partir del periodo 93-96 (P_i) de árboles ≥ 10 cm DAP y que no fueron monitoreados en P_0 .

Ganancia de C aéreo por crecimiento de supervivientes ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$): Se determinó a partir del periodo de 92-93 del crecimiento de los individuos que estaban vivos durante el año inicial (P_0) y en los intervalos de los siguientes periodos (P_i).

Ganancia total de C aéreo ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$): Se calculó de la suma de la ganancia de C aéreo de reclutas y supervivientes.

Pérdida de Carbono aéreo ($\text{Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$): Se calculó a partir de aquellos árboles muertos en el P_0 , y se consideró las pérdidas de C con valores negativos.

Ganancia de C aéreo neto (CN): Se determinó a partir de la ganancia de C aéreo por reclutas y crecimiento por supervivencia, menos la pérdida por mortalidad.

También se analizaron las condiciones de muerte que contribuyen a la pérdida de C aéreo, clasificadas en seis categorías y que fueron propuestas y medidas por la Unidad de Ecología en el Manejo de Bosques Tropicales del CATIE.

Para el cual se tomaron los valores del cálculo de pérdida de C aéreo por mortalidad ($\text{PC}_m \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), y se distribuyeron según la contribución de cada condición de muerte en la pérdida de C aéreo en los tres tratamientos a lo largo de las tres décadas (**Tabla 3**).

Tabla 3. Condiciones de muerte consideradas en el estudio

Abrev.	Condiciones de muerte
M1	Muerto en pie con ramas
M2	Muerto en el suelo quebrado o descopado
M3	Muerto desraizado
M4	Muerto por lianas o por caída de otro árbol
M5	Desconocido
M6	Aprovechamiento o tratamiento silvicultural

3.5. Tratamiento de datos

Se realizaron análisis comparativos de ANOVA utilizando modelos lineales generales (MGM) en el software Navure (Navure Team 2023) para analizar la ganancia de C por la regeneración natural reclutada (Ec.3), crecimiento por supervivientes (Ec.4), ganancia total (Ec.5), pérdida de C aéreo por mortalidad (Ec.6) y ganancia neta de C aéreo (Ec.7). Se consideraron los tratamientos (Trat), periodos (Per) y la interacción tratamientos*periodos, como efectos fijos, mientras las parcelas (P) se consideraron como efectos aleatorios. Para controlar la variabilidad de la ganancia por crecimiento de supervivientes se utilizó como covariable al total de muertos.

$$Y_{\text{Reclutada},ijk} = \mu + \text{Trat}_i + \text{Per}_j + (\text{Trat} * \text{Per})_{ij} + P_k + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ec.3})$$

$$Y_{\text{supervivientes},ijk} = \mu + \text{Trat}_i + \text{Per}_j + (\text{Trat} * \text{Per})_{ij} + \beta \cdot \text{NumMuertos}_{ijk} + P_k + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ec.4})$$

$$Y_{\text{total},ijk} = \mu + \text{Trat}_i + \text{Per}_j + (\text{Trat} * \text{Per})_{ij} + P_k + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ec.5})$$

$$Y_{\text{mortalidad},ijk} = \mu + \text{Trat}_i + \text{Per}_j + (\text{Trat} * \text{Per})_{ij} + P_k + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ec.6})$$

$$Y_{\text{neta},ijk} = \mu + \text{Trat}_i + \text{Per}_j + (\text{Trat} * \text{Per})_{ij} + P_k + \varepsilon_{ijk} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde, Y_{reclutas} , $Y_{\text{supervivientes}}$, Y_{total} , $Y_{\text{mortalidad}}$, Y_{neta} , ijk ; es la respuesta al i -ésimo tratamiento en el j -ésimo periodos y k -ésimo parcela, μ la media general de C aéreo; Trat_i efecto fijo del tratamiento i ; Per_j Efecto fijo del periodo j ; $(\text{Trat} * \text{Per})_{ij}$ efecto de la interacción entre el tratamiento i y el periodo j ; P_k efecto aleatorio de la parcela k y ε_{ijk} error asociado a la observación Y_{reclutas} , $Y_{\text{supervivientes}}$, Y_{total} , $Y_{\text{mortalidad}}$, Y_{neta} , ijk . Específicamente para la ganancia por

crecimiento de supervivientes se consideró en el modelo $\beta \cdot \text{NumMuertos}_{ijk}$ efecto de la covariable, que representa el impacto del número total de árboles muertos (NumMuertos). β es el coeficiente de regresión asociado con la covariable.

Los modelos seleccionados tuvieron los menores valores de AIC y BIC utilizando la varianza exponencial (Ec. 8) para las variables mencionadas. Donde, $\text{Var}(\epsilon_{ijk})$ varianza de los errores residuales (ϵ_{ijk}) en el modelo, σ^2 varianza base de los errores residuales, "e" base del logaritmo natural y θ parámetro que determina la tasa de cambio exponencial de la varianza.

$$\text{Var}(\epsilon_{ijk}) = \sigma^2 e^{2\theta} \quad (\text{Ec.8})$$

Así mismo, se verificó el cumplimiento de los supuestos de homogeneidad de varianza, normalidad e independencia de datos, adoptando un nivel de significancia de $<0,05$ en todos los análisis.

Por otro lado, de manera complementaria se realizó un gráfico de barras en el software R Studio para identificar la contribución a la pérdida de C aéreo por las diferentes condiciones de muerte. Para ello, se calcularon los promedios de pérdida de C aéreo por cada condición de muerte.

CAPITULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

4.1. Ganancia de C aéreo por reclutamiento y crecimiento de árboles supervivientes

La ganancia de C aéreo por reclutas para cada una de las interacciones tratamiento \times año fue significativo ($F= 2,98$, $p=0,003$), lo que indica que tanto los tratamientos como los periodos tuvieron efectos significativos en la ganancia de reclutas (Tabla 4 y Figura 3).

Tabla 4. Efecto de los tratamientos, periodos y la interacción tratamiento \times periodos del incremento de C aéreo de reclutas, los valores de $p<0.05$ indican diferencias estadísticamente significativas.

Fuente	F	p-valor
Tratamientos	3,63	0,0926
Periodos	34,18	<0,0001
Tratamientos \times Periodos	2,98	0,0031

En el tratamiento Aprovechado en adelante Ap, los reclutas generaron un incremento significativamente alto de C aéreo en los dos últimos periodos ($0,16\pm 0,19$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹), diferenciándose del efecto inmediato del tratamiento (1993-1996) y de los periodos 1998 al 2006, donde se observó las contribuciones más bajas (Figura 3). Específicamente, los incrementos de C aéreo por reclutas de los periodos 2006-2010 y 2010-2021 se diferenciaron de los periodos mencionados anteriormente, excepto de 1996-1997; sin embargo, para el periodo 2010-2021 no hubo variación significativa del incremento de C aéreo respecto al periodo 1997-1998.

En las parcelas con tratamientos silviculturales (en adelante ApTS), los reclutas incrementaron el C aéreo significativamente por efecto del primer

tratamiento para el periodo 1996-1997 ($\pm 0,31$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹), diferenciándose del periodo posterior a la aplicación silvicultural (1993-1996) y de los periodos posteriores hasta 2006-2010. En los dos últimos periodos, los reclutas alcanzaron sus máximos incrementos de C aéreo ($0,18 \pm 0,27$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹) por efecto de los tratamientos silviculturales combinados, diferenciándose de periodos anteriores, excepto con 1996-1997. No obstante, el último periodo no se diferenció del periodo 1997-1998 (Figura 3).

En el tratamiento sin intervención (en adelante T) el incremento de C aéreo por reclutas tuvo contribuciones bajas en casi todos los años de evaluación, a excepción de los periodos 1996-1997 y 2006-2010, que se diferenciaban únicamente del incremento de C aéreo de ApTS. Por otro lado, en el periodo 96-97 ($\pm 0,15$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹) y los dos últimos periodos ($0,14 \pm 0,19$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹), los reclutas de T alcanzaron los máximos incrementos de C aéreo en comparación con otros periodos.

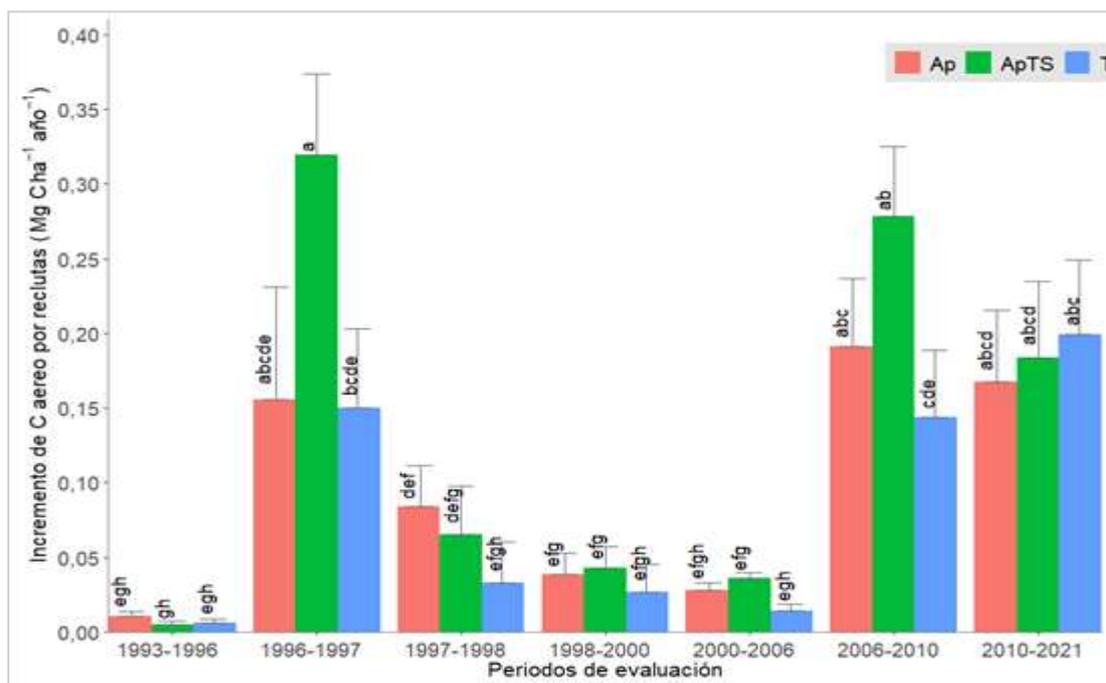


Figura 3. Ganancia anual de C aéreo de la regeneración reclutada en el bosque manejado, donde Ap= Aprovechamiento, ApTS= Aprovechamiento y tratamientos silviculturales, T=sin intervención y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas de la interacción tratamientos^xperiodos.

La interacción Tratamiento \times Periodos del incremento de C aéreo por el crecimiento de supervivientes no mostró un efecto significativo del tratamiento ($F=1,96$, $p=0,059$). Sin embargo, se observa cambios en el incremento de C aéreo a lo largo de los periodos de evaluación ($F=6,45$, $p<0,0001$, Tabla 5 y Figura 4).

Tabla 5. Efecto de los tratamientos, periodos, número total de árboles muertos y la interacción tratamiento \times periodos del incremento por el crecimiento de supervivientes, los valores de $p<0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas

Fuente	F	p-valor
Tratamientos	0,19	0,8284
Periodos	6,45	<0,0001
Número total de árboles muertos	0,21	0,6527
Tratamientos \times Periodos	1,96	0,059

En Ap, se evidenció que después de su aplicación los árboles supervivientes mantuvieron un incremento de C aéreo constante en la mayoría de los periodos, excepto en el 2006-2010, donde resulto en un incremento de C aéreo significativamente mayor ($\pm 5,31$ Mg C ha $^{-1}$ año $^{-1}$). a los periodos de 1992-1993, 1993-1996, 1998-2000, 2000-2006, y 2010-2021.

En el tratamiento ApTS, los árboles supervivientes en el periodo 1996-1997 tuvieron un incremento de C aéreo alto y significativo ($\pm 5,28$ Mg C ha $^{-1}$ año $^{-1}$) producto de la primera intervención silvicultural (1992-1993). La aplicación de una segunda intervención silvicultural (1996-1997) genero que los supervivientes en el periodo 1997-1998 no mostrará incrementos significativos de C aéreo ($\pm 3,25$ Mg C ha $^{-1}$ año $^{-1}$) respecto al periodo de 1996-1997. Una nueva disminución del incremento de C aéreo ($\pm 3,94$ Mg C ha $^{-1}$ año $^{-1}$) se evidencia en al final del periodo que se diferencia del periodo 1996-1997 (Figura 4).

En las parcelas de T, se observa tendencias variables en el incremento de C aéreo de árboles supervivientes, como en Ap y ApTS. En T, las variaciones significativas ocurren únicamente en el periodo 1997-1998 (3,61 Mg C ha $^{-1}$

año⁻¹), donde se registra una disminución significativa en el incremento de C aéreo.

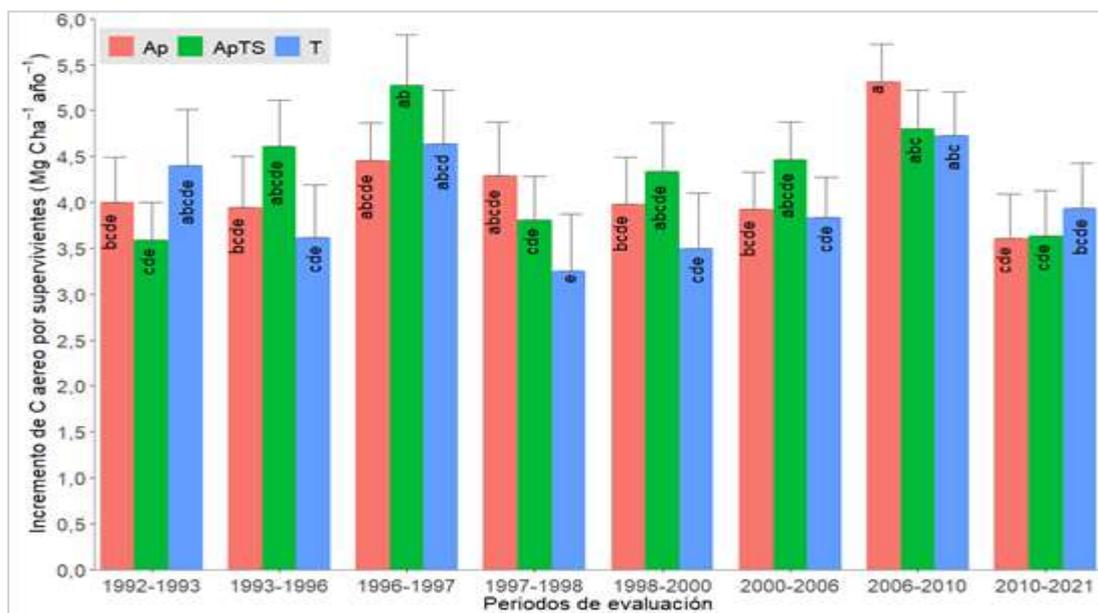


Figura 4. Ganancia anual del C aéreo por el crecimiento de supervivientes en el bosque manejado, donde Ap= Aprovechamiento, ApTS= Aprovechamiento y tratamientos silviculturales, T=sin intervención y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas a lo largo de los periodos.

Ganancia total de C aéreo

La ganancia total de C aéreo (Tabla 6 y Figura 5) no tuvo un efecto significativo del tratamiento ($F=1,12$, $p=0,06$). Sin embargo, se observa cambios significativos en el incremento de C aéreo en los periodos de evaluación ($F=16,68$, $p<0,0001$).

Tabla 6. Efecto de los tratamientos, periodos, y la interacción tratamiento*periodos del incremento total, los valores de $p<0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas.

Descripción	F	p-valor
Tratamientos	0,28	0,7629
Periodos	16,68	<0,0001
Tratamientos×Periodos	1,91	0,06

En Ap y ApTS, el incremento total de C aéreo permitió alcanzar sus máximos incrementos totales promedio de C aéreo en los periodos 1996-1997 y 2006-2010. Específicamente en Ap, los valores de incremento total de C aéreo de estos periodos fueron aproximadamente similares ($5,36 \pm 5,49 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y diferían con la mayoría de los periodos excepto del periodo 1997-1998. Por otro lado, en ApTS, el incremento total de C aéreo de ambos ($5,08 \pm 5,63 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) se diferenciaba de otros periodos excepto de 1993-1996, y adicionalmente el periodo 2006-2010 no difería de los periodos de 1998-2000 y 2000-2006. Estas variaciones en el incremento total de C aéreo se deben al efecto de los tratamientos silviculturales (**Figura 5**).

En las parcelas T, el incremento total mostro valores mayores de C aéreo en el periodo 2006-2010, diferenciándose del incremento total de C aéreo de otros periodos, excepto de los periodos 1992-1993, 1996-1997 y 2010-2021 (Figura 5).

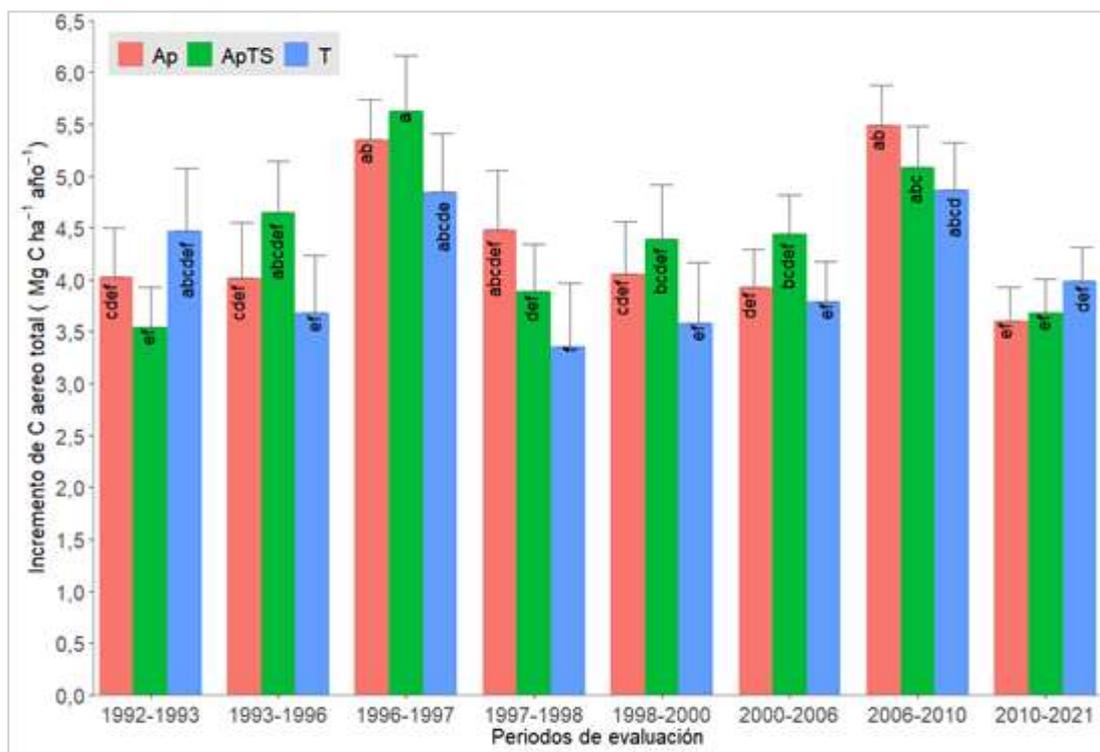


Figura 5. Ganancia total del C aéreo en el bosque manejado, donde Ap= Aprovechamiento, ApTS= Aprovechamiento y tratamientos silviculturales, T=sin intervención y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas a lo largo de los periodos.

4.2. Pérdida de C aéreo por muerte de árboles

El análisis revela que los tratamientos generan un efecto a medida que pasa los años ($F= 6,46$, $p<0,0001$, Tabla 7 y Figura 6), letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 7. Efecto de los tratamientos, periodos, y la interacción tratamiento*periodos de la pérdida de C aéreo de la muerte de árboles, los valores de $p<0,05$ indican diferencias estadísticamente significativas.

Descripción	F	p-valor
Tratamientos	3,45	0,1005
Periodos	12,13	<0,0001
Tratamientos ^x Periodos	6,46	<0,0001

Las pérdidas de C aéreo en Ap, fueron significativamente mayores poco después de la perturbación por las actividades de extracción maderera ($-21,86 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y durante el tercer periodo de evaluación ($-7,16 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

En las parcelas con tratamientos silvícolas (ApTS) evidencia pérdidas altas y significativas de C aéreo de $\pm 13,51 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ desde el periodo 1996-1997 hasta 1997-1998. Posteriormente las pérdidas de C aéreo se redujeron y se mantuvieron con ligeras variaciones hasta el último periodo tanto en Ap y ApTS (Figura 6).

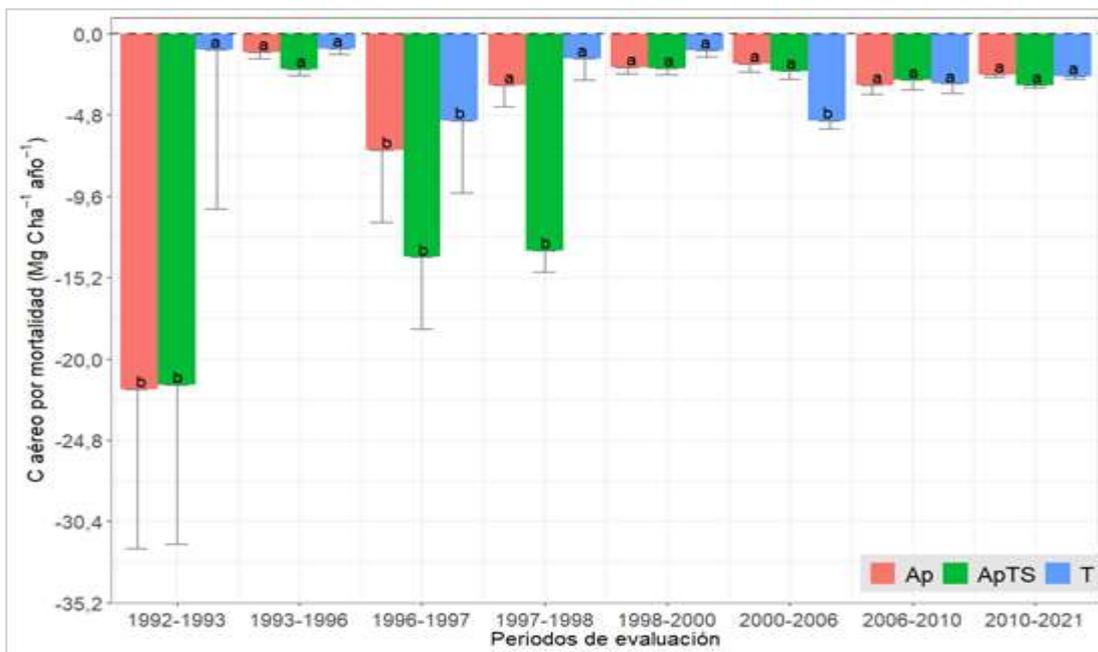


Figura 6. Medias de pérdida de C aéreo por la muerte de árboles en el bosque manejado, donde Ap= Aprovechamiento, ApTS= Aprovechamiento y tratamientos silviculturales, T=sin intervención y letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas a lo largo de los periodos.

En el primer periodo de T, la pérdida de C aéreo fue significativamente menor que lo evidenciado en Ap y ApTS. Las pérdidas significativamente altas de C aéreo ocurren en los periodos 1996 a 1997 ($-4,48 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y 2000 a 2006 ($-5,08 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). No obstante, este último periodo presenta valores negativos significativos de pérdidas de C aéreo que difiere de Ap y ApTS (Figura 6).

En la Figura 7, se observan las variaciones de la pérdida de C aéreo por cada condición de muerte, donde en algunos periodos ciertas condiciones de muerte contribuyen más significativamente a la pérdida de C aéreo. En específico, las condiciones de muerte por intervenciones de aprovechamiento (M6, Figura 7A) y tratamiento silvicultural (M6, Figura 7B) fueron las que tuvieron mayor contribución a la pérdida de C aéreo de $16,37 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $14,57 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Estas pérdidas ocurrieron específicamente durante los años de aplicación de las actividades forestales y en caso específico de los tratamientos silviculturales las contribuciones se extendieron hasta el periodo 1997-1998 ($11,67 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

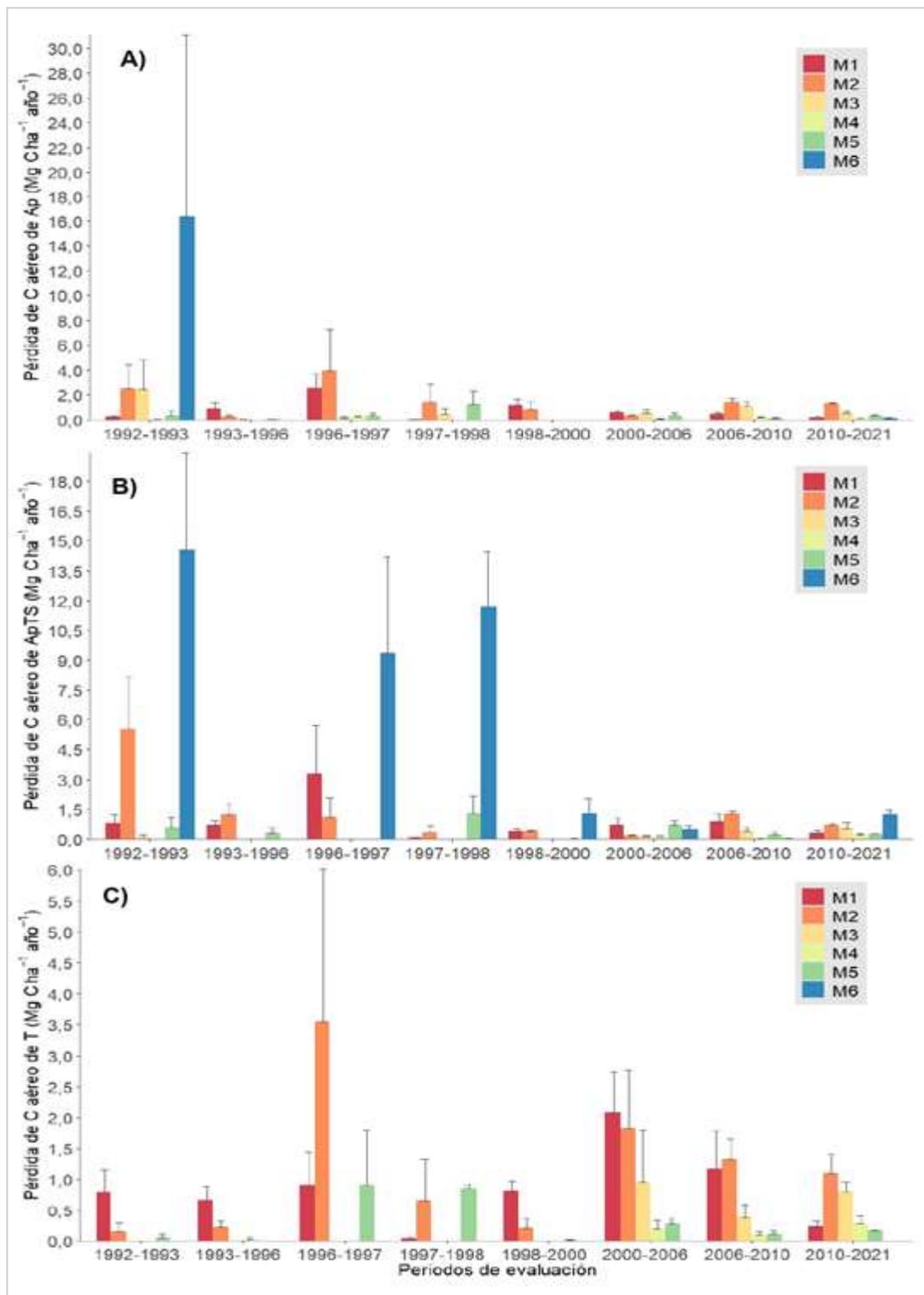


Figura 7. Medias de pérdida de carbono aéreo por diferentes condiciones de muerte, donde M1: Muerto en pie con ramas; M2: Muerto en el suelo quebrado o descopado; M3: Muerto desraizado; M4: Muerto por lianas o por caída de otro árbol; M5: Desconocido; M6: Aprovechamiento o tratamiento silvicultural

En Ap (Figura 7A), las contribuciones por muerte en pie con ramas (M1) y Muerto en el suelo quebrado o descopado (M2) en el periodo 1996-1997 tuvieron valores de pérdida de C aéreo de 2,58 y 3,93 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, que probablemente este asociado a muertes naturales. En ApTS (Figura 7B), en el periodo 1996-1997, la condición M1 contribuye en 3,27 Mg C ha⁻¹ año⁻¹, que posiblemente se deba a condiciones naturales puesto que es el año donde recién se aplicó los tratamientos silvícolas.

Por otro lado, las condiciones de muerte desraizado (M3), por lianas o por caída de otro árbol (M4) y por causas desconocidas (M5) tiene contribuciones muy bajas tanto en Ap y ApTS.

En cambio, las áreas sin intervención (T, Figura 7C), las muertes en pie con ramas (M1), en el suelo quebrado o descopado (M2) y muerte desraizada (M3) tuvieron contribuciones a la pérdida de C aéreo casi en la mayoría de los periodos de evaluación. Donde M1 tuvo una contribución relevante de 2,08 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ en el periodo 2000-2006 y continuo en el periodo 2006-2010 (1,18 Mg C ha⁻¹ año⁻¹). M2 tuvo una contribución alta de 3.56 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ en el periodo 1996-1997, seguido de 1,83 y 1,33 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ en el periodo 2000-2006 y 2006-2010. Por último, M3 mostró una contribución mayor de pérdida de C aéreo en los últimos tres periodos de evaluación, con valores de 0,96 a 0,81 Mg C ha⁻¹ año⁻¹.

4.3. Cambio neto de carbono aéreo

La ganancia neta de C aéreo esta influenciada por los tratamientos y varia a medida que transcurre los años (F=4,94, p<0,0001, Tabla 8 y Figura 7).

Tabla 8. Efecto de los tratamientos, periodos, y la interacción tratamiento*periodos del cambio neto de C aéreo, los valores de p<0.05 indican diferencias estadísticamente significativas.

Descripción	F	p-valor
Tratamientos	4,45	0,0652
Periodos	13,83	<0,0001
Tratamientos*Periodos	4,94	<0,0001

En el primer periodo de Ap los incrementos netos de C aéreo resultaron significativamente negativos entre 16 a 20 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ producto de la extracción de madera. Un año después de la extracción (1993-1996), el C aéreo tuvo un incremento neto positivo de 3 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Al tercer periodo nuevamente el incremento neto descendió negativamente. A partir del periodo 1997-1998 el incremento neto anual de C aéreo fue positivo y variaba entre 1 ± 3 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ hasta el periodo 2010-2021 (Figura 7).

Luego de aplicar los tratamientos silviculturales, se observó una disminución significativa del incremento neto de C aéreo hasta el periodo 1997-1998, y con valores negativos más altos de -9,48 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Para los siguientes periodos los incrementos netos de C aéreo fueron positivos, con valores promedios entre $0,80 \pm 2,20$ Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (Figura 7).

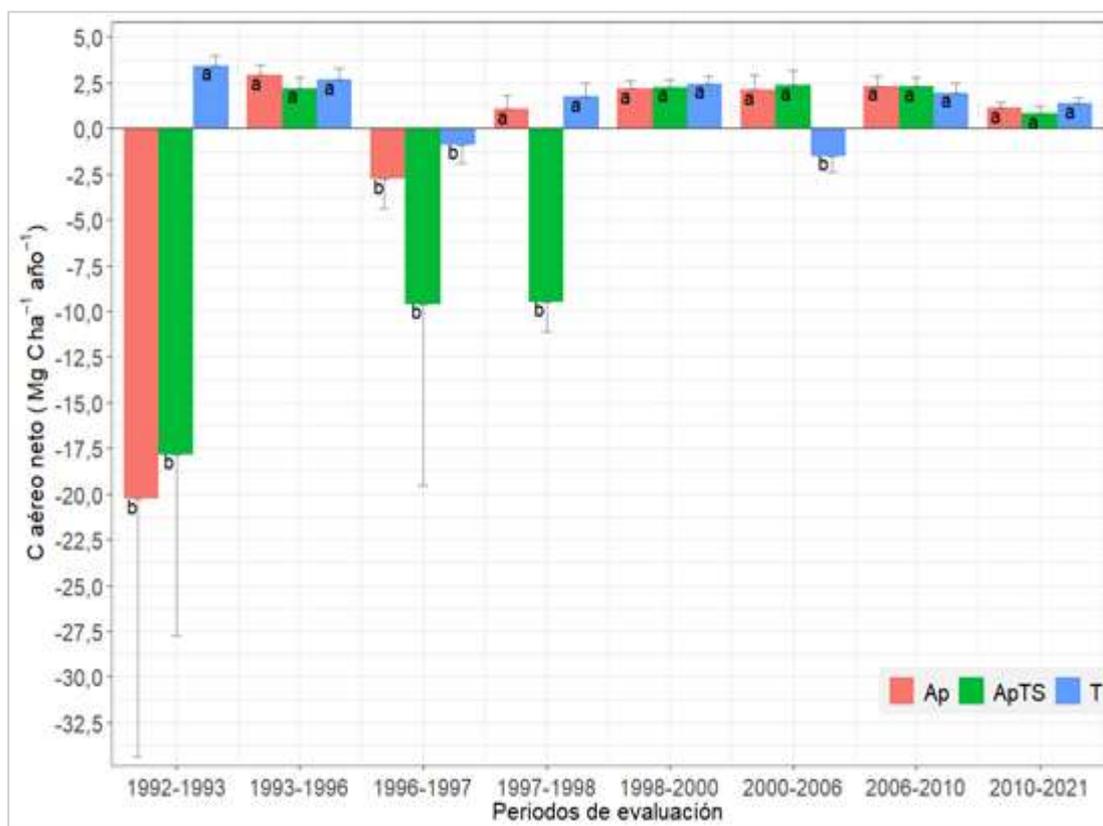


Figura 8. Medias de cambios netos del C aéreo- en un bosque manejado, letras diferentes indican diferencia significativa entre tratamientos y años.

En las áreas sin intervención (T), el flujo de C aéreo tuvo valores positivos en casi todos los periodos, excepto para los periodos 1996-1997 y 2000-2006, donde se registró un decremento significativo de 0,90 y 1,51 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Siendo el periodo 2000-2006 que difiere significativamente del incremento neto positivo de Ap y ApTS. Además, T siempre presentó incrementos netos positivos de C aéreo que difieren de los flujos de C aéreo de Ap y ApTS, solamente en los periodos 1992-1993 y 1997-1998 (Figura 7).

DISCUSION

Este estudio evidencia, que los bosques manejados sosteniblemente tienen la capacidad de influir en la conservación de los servicios ecosistémicos (Finegan et al. 2015; Pearson et al. 2017), particularmente sobre la dinámica del C aéreo. Además, la gestión forestal en términos de la aplicación de AIR y tratamientos silviculturales surge como una alternativa de conservación y adaptación que permite que el bosque sea más resiliente ante las perturbaciones del cambio climático (Edwards et al. 2014). A ello, se agrega que el AIR en los bosques de Costa Rica forma parte de muchos de los acuerdos y compromisos climáticos para reducir las emisiones de C (REDD+ 2021), además de garantizar los beneficios del bosque a largo plazo.

Se evidencia que la aplicación de AIR y tratamientos silvícolas generaron pérdida de C aéreo que provocó cambios en la dinámica de C aéreo en un tiempo relativamente corto. Aunque, posterior permitió que el crecimiento de árboles supervivientes y el reclutamiento de nuevos árboles generaran efectos positivos, influenciados por la aplicación de técnicas forestales sobre todo de tratamientos silvícolas. De manera que los resultados evidenciados demuestran al manejo forestal sostenible como una actividad que incentiva la captura y el almacenamiento de C aéreo. No obstante, podría ser que también estén afectados por eventos meteorológicos extremos que pudieran generar efectos en la dinámica del C aéreo de este bosque (Alvarado 2003, Alfaro et al 2007, INM 2008), como han demostrado otros estudios similares sobre efectos de estos eventos (Clark et al. 2003; D' Oliveira et al. 2017; Hu et al. 2020; San-José et al. 2021).

Las intervenciones forestales contribuyen al incremento de C aéreo por reclutas y crecimiento de supervivientes

Después de las intervenciones forestales, los reclutas no generaron ganancias inmediatas de C aéreo; estas ganancias se observaron al cuarto año en Ap y a partir de los 15 años en adelante en ambos tratamientos, especialmente en áreas con intervención silvicultural. Estudios similares mencionan que los reclutas generan contribuciones insignificantes al año siguiente de su aplicación (Blanc et al. 2009; Mazzei et al. 2010; Roopsind et al. 2018) y que comienzan a ganar C notablemente después de 10 años de las intervenciones (Blanc et al. 2009; Sist et al. 2012; D' Oliveira et al. 2017). Esto es similar a lo observado en este bosque, donde el conjunto de perturbaciones puede haber favorecido que géneros específicos sean más abundantes (Esquivel-Muelbert et al. 2019).

Una intervención silvicultural después de la tala también genera que reclutas contribuyan a las ganancias de C aéreo por un tiempo mucho más prologando y en mayor cantidad que en áreas taladas, como lo evidencian los estudios de Hu et al. (2020) y Roopsind et al. (2018). Estos estudios respaldan la idea de que los tratamientos silviculturales efectivamente mejoran el establecimiento de regeneración natural. Además, es probable que, en este bosque, las condiciones generadas por las actividades forestales y los eventos climáticos (Hu et al. 2020), fomentaran la competencia entre individuos (D'Oliveira et al. 2017) sobre todo de especies adquisitivas que responden favorablemente a cambios de condiciones del bosque (Finegan et al. 2015). Adicionalmente, esto puede haber provocado el desarrollo inmediato de una gran cantidad de árboles pequeños con diámetros ≤ 10 cm DAP, que surgieron por la apertura del dosel debido a las perturbaciones (Mazzei et al. 2010; De Avila et al. 2015; Dionisio, Luiz Fernandes et al. 2018), y que aumentaron temporalmente (De avila et al. 2015), incluso en las parcelas sin intervención de este estudio.

La ganancia de C aéreo por parte de árboles supervivientes no fue mayor a la observada antes de la extracción por AIR, y permaneció así hasta los 15 años. Estos resultados son consistentes con el estudio de Sist et al. (2012)

que reporta incluso una disminución al final del periodo similar a este bosque, aunque en este no se tuvo una segunda extracción por AIR. Sin embargo, algunos otros estudios (Blanc et al. 2009; Roopsind et al. 2018, Hu et al. 2020), señalan que la intensidad aplicada para AIR permite mantener un gran número de árboles remanentes, que aportan una mayor cantidad de C aéreo.

Generalmente una segunda intervención consiste en la eliminación de árboles no comerciales, que provocan una mayor apertura del dosel, que incentiva que árboles de diámetros intermedios aumenten su tamaño y contribuyan al incremento de C aéreo (Gourlet-Fleury et al. 2013; Sist et al. 2014). En este bosque en específico, poco después de una segunda intervención silvicultural, la ganancia de C aéreo se desaceleró, pero provocó que los árboles supervivientes aumentaran la ganancia de C aéreo casi a su estado inicial que en años posteriores. Esto demuestra que las intervenciones iniciales pueden resultar cruciales para recuperar o capturar mayor carbono aéreo a largo plazo (Hu et al. 2020), no obstante, con una intensidad baja el crecimiento de estos no sería estimulado (Roopsind et al. 2018).

Las ganancias de C aéreo total fueron atribuido principalmente al crecimiento de supervivientes, con una contribución menor por parte de reclutas por lo que se comprueba la hipótesis parcialmente. En el estado de Pará-Brasil, un estudio encontró que los árboles supervivientes son los principales acumuladores de C aéreo en comparación con los reclutas (Mazzei et al. 2010) aunque los años de evaluación no son comparables con este estudio. Esto es común en bosques se tiene una cantidad significativa de especies con rasgos foliares conservadores, que tienen como característica almacenar mayor C aéreo en etapas adultas (Finegan et al. 2015). De manera que, son los responsables del 50% del C aéreo del bosque (Sist et al. 2014), y esto también se debe a las altas densidades de madera de algunas especies que tienen menos posibilidades de morir (Nam, Anten y van Kuijk 2018). Mientras que los reclutas por sus características

fenológicas apenas contribuyen entre el 20% (Nam, Anten y van Kuijk 2018) al 26% (Sist et al. 2014) de C aéreo.

Además, se observaron variaciones de incremento de C aéreo en los tratamientos, donde en algunos periodos se observaron mayores contribuciones por parte de los reclutas. Este escenario podría ser causa del estímulo generado por el conjunto de perturbaciones forestales (Ap y ApTS) y factores climáticos, que según D' Oliveira et al. (2017) genera que estos eventos incrementen las contribuciones de C aéreo por parte de los reclutas. Sin embargo, esto puede resultar perjudicial cuando se enfrentan a perturbaciones repetitivas que crean condiciones desfavorables para árboles que crecen bajo sombra, e incluso fomentarían un mayor desarrollo de lianas (Ngute et al. 2024) o especies de sotobosque (Sist et al. 2014). Finalmente, en comparación con las áreas sin intervención, las ganancias de C aéreo por reclutas y arboles supervivientes fueron mayores en áreas intervenidas por AIR y tratamientos silviculturales.

Las intervenciones forestales generan la pérdida de C aéreo por mortalidad de arboles

Las parcelas de Ap y ApTS, después de las intervenciones forestales si generan la mayor pérdida de C aéreo, pero a corto plazo y en un periodo determinado el área sin intervención genera mayor pérdida de C aéreo, lo que confirma la hipótesis parcialmente. En los bosques de la Guayana Central, AIR y el tratamiento silvicultural generaron pérdidas mayores de C aéreo del 23% y 42% (Roopsind et al. 2018) a la misma intensidad que este estudio. Por otro lado, las pérdidas máximas de C ocurren inmediatamente después de la extracción de madera y tiende a disminuir con el tiempo (Blanc et al. 2009; Mazzei et al. 2010; Sist et al. 2014). La magnitud de pérdidas de C depende de la intensidad de la tala; en Brasil una intensidad moderada produce una pérdida media de C aéreo de 31,8 Mg C ha¹ y 12,5 Mg C ha¹ (Mazzei et al. 2010). Mientras en Guayana Francesa aproximadamente entre 5.8 y 14.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Blanc et al. 2009; D'Oliveira et al. 2017), valores equivalentes similares a los encontrados en este estudio.

Un incremento en la intensidad por actividades complementarias, como los tratamientos silviculturales genera una pérdida de C aéreo gradual que se extienden hasta años posteriores, como han demostrado diversos estudios (Blanc et al. 2009; Roopsind et al. 2018). Sin embargo, en ocasiones la aplicación de tratamientos silvícolas puede producir pérdidas superiores de C aéreo a las causadas la extracción (Blanc et al. 2009). Producto de la muerte de un mayor número de árboles no comerciales (Finegan y Camacho 1999; Hu et al. 2020).

-La reducción de las pérdidas de C a lo largo del tiempo en los tres tratamientos puede estar relacionada con una menor mortalidad de individuos grandes y en su lugar podrían estar muriendo especies de sucesión temprana que emiten menos C aéreo (Sist et al. 2014). Además, las pérdidas de C años después de las actividades forestales pueden no estar exclusivamente relacionadas con estas, sino también con la frecuencia de las perturbaciones naturales (D' Oliveira et al. 2017; Hu et al. 2020), aunque no se analizó su relación con el clima en este estudio.

Las pérdidas significativas de C aéreo en los periodos 1996-1997 y 2000-2006 en las áreas sin intervención, nos lleva a manifestar que podría deberse a los efectos del clima. Un estudio de Costa Rica encontró que la mayor muerte de árboles se debía al efecto de la variabilidad climática constante (San-José et al. 2021). Este fenómeno, podría estar generando pérdidas de C aéreo en Ap y ApTS; puesto que estudios han revelado que la muerte de árboles en áreas aprovechadas y no aprovechadas también se atribuye a sequías (Mazzei et al. 2010; Espírito-Santo et al. 2014; Vidal, West y Putz 2016; Hu et al. 2020) o lluvias extremas. Incluso después de la combinación de estas perturbaciones, especies de sucesión temprana y tardías podrían estar muriendo, producto de la caída de árboles viejos (San Jose et al. 2021).

Condiciones de muerte que generan pérdida de C aéreo

En general, las áreas sin intervención están asociadas a muertes naturales como muerte de pie con ramas, muerto en el suelo quebrado o descopado y

muerte desraizada (Figura 7C). Estas condiciones de mortalidad son típicas de procesos naturales, puesto que las principales causas de mortalidad de árboles están asociadas con variaciones climáticas, la exposición de plagas y otros factores ecológicos que genera una perturbación en el bosque (Brienen et al. 2015; Arellano, Zuleta y Davies 2021; Esquivel-Muelbert et al. 2020), aunque estas causas no están completamente claras. Sin embargo, la falta de estudios a largo plazo sobre la mortalidad dificulta la identificación precisa de las causas exactas de muerte (Zuleta et al. 2022). Es importante considerar el seguimiento y el tipo de daño que generan la combinación de perturbaciones forestales más la frecuencia de perturbaciones climáticas, para conocer con veracidad la muerte de estos árboles.

Aunque estas pérdidas de C aéreo por procesos naturales no fueron mayores a las áreas intervenidas, siendo el aprovechamiento contribuyó en gran medida a la pérdida de C aéreo. Según Sist et al. (2014), las actividades forestales pueden causar daños con efectos retardados en árboles remanentes y que resulta en pérdidas de C aéreo del 40%. Estos efectos rezagados pueden ser causados por factores estructural y/o fisiológico (Esquivel-Muelbert et al. 2020), como árboles muertos quebrados o descopados, desraizados e incluso muertos por liana o caída de otro árbol en Ap y ApTS; que pueden generar un impacto de mortalidad del 22 al 45% (Zuleta et al. 2022).

Por otro lado, la muerte en pie que ocurre gradualmente puede ser causado por episodios de daño, como la pérdida de sus hojas o alguna estructura del árbol que con el tiempo resulta en la muerte del árbol (Espírito-Santo et al. 2014; Zuleta et al. 2022), en este caso específico se asocia con la aplicación del tratamiento silvicultural.

Cambios en la dinámica de C aéreo

A lo largo de tres décadas las intervenciones forestales (Ap y ApTS) inicialmente ocasionaron altas disminuciones de C, seguidas de aumentos continuos con ligeras reducciones. El AIR y los tratamientos silvícolas en el Escudo Guayanés (Roopsind et al. 2018) y en Paragomina, Brasil (Mazzei

et al. 2010) generaron cambios negativos inmediatos después de la extracción y su recuperación dependía de los daños generados a árboles remanes y el ingreso de nuevos reclutados. No obstante, las variaciones en el C aéreo dependen de la intensidad baja-moderada y/o alta (Finegan y Camacho 1999; Blanc et al. 2009; Gourlet-Fleury et al. 2013; Hu et al. 2020). Por tanto, la muerte de árboles será el factor principal de los cambios netos del C aéreo (Sist et al. 2014). Que ante cualquier alteración drástica puede mantener el C neto nulo o llevarlo a un desequilibrio (Sist et al. 2014; Pioniot et al. 2016).

Por otro lado, el incremento neto de C aéreo en áreas T se mantuvo con cambios mínimos durante la mayor parte del periodo de evaluación, lo cual es común en un bosque donde los flujos de C aéreo posiblemente estén en equilibrio (Mazzei et al. 2010; Gourlet-Fleury et al. 2013). Casualmente, el estudio de Mazzei et al. (2010) informa que cambios netos de AGB en estas áreas son mínimas. Además, resulta interesante evidenciar que el único cambio notable y negativo de C aéreo neto en las parcelas T ocurrió en el periodo 2000 a 2006, que podría ser por impactos de eventos meteorológicos (San-José et al. 2021).

Esto sugiere que es probable que el C aéreo haya disminuido en los tres tratamientos a lo largo de las tres décadas, especialmente con más frecuencia a partir de 1996 (Alvarado y Alfaro 2003; Alfaro, Quesada y Solano 2010; San-José et al. 2021). Por tanto, es importante y necesario examinar los efectos de la intensificación de estas perturbaciones a lo largo del tiempo que puede provocar la apertura del dosel en varias ocasiones.

Además, resulta necesario resaltar que este bosque está dominado por *P. maculoba*, una especie de sucesión tardía, que según Finegan y Camacho (1999), determina al bosque como el más dinámico y que favorece a la conservación de los servicios ecosistémicos, especialmente la producción de madera. Adicional a ello, los cambios en la dinámica del C aéreo también dependen del tipo de bosque en el que se realicen las actividades forestales (Pioniot et al. 2016), y asimismo de las características específicas que los componen.

CONCLUSIONES

Como es de esperar, El manejo forestal, con la aplicación de AIR y tratamientos silvícolas, ha causado efectos significativos en la dinámica de C aéreo a lo largo de tres décadas. Los efectos más marcados ocurrieron en las áreas intervenidas; sin embargo, el largo plazo del estudio permitió detectar también efectos en el bosque testigo, lo que confirma la hipótesis general del estudio y resalta la relevancia de la información obtenida en este bosque manejado.

El estudio muestra que, a largo plazo, el aumento del C se debió principalmente al crecimiento de supervivientes y que una contribución importante de los reclutas se limita a periodos cortos de tiempo, después de las intervenciones. Esta hipótesis se comprueba parcialmente, puesto que las intervenciones aumentaron el C aéreo únicamente por el crecimiento de árboles supervivientes y por reclutas solo en algunos periodos.

La mortalidad de árboles durante los periodos de intervención forestal provocó pérdidas de C inmediatas que tienden a disminuir con el tiempo. Las mayores pérdidas de C aéreo estuvieron influenciadas por impactos inmediatos de las intervenciones forestales como por factores naturales de influencia esporádica en todo el bosque. La hipótesis se comprueba parcialmente, como es evidente la mayor pérdida de C fueron en las áreas intervenidas y por un tiempo corto.

Finalmente, las ganancias netas C fueron positivas y predominaron durante los 30 años de estudio en todas las parcelas, una muestra de la resiliencia de este ecosistema., con condiciones de mortalidad similares en las áreas intervenidas como en el área testigo, en su mayoría.

SUGERENCIAS

Los resultados obtenidos indican la necesidad de realizar estudios adicionales para comprender mejor los cambios en la dinámica de C aéreo debido al manejo forestal y el cambio climático. Aunque este estudio no priorizó la comprensión de los efectos climáticos, es evidente los efectos que genera.

Por lo tanto, es fundamental desarrollar estrategias de manejo forestal que incluyan en la planificación la adaptación a perturbaciones naturales para minimizar los efectos negativos. Debido a las evidencias de ambos factores, es probable que este bosque haya adquirido resiliencia, que son claves para diseñar estrategias de manejo forestal sostenible en el contexto del cambio climático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFARO, E.J., QUESADA, A. y SOLANO, F., 2010. Análisis del impacto en Costa Rica de los ciclones tropicales ocurridos en el Mar Caribe desde 1968 al 2007. *Diálogos, Revista Electrónica de Historia* [en línea], vol. 11, no. 1409-469X.
- ALVARADO, L.F. y ALFARO, E.J., 2003. Frecuencia de los ciclones tropicales que afectaron a Costa Rica durante el siglo XX. *Top. Meteor. Oceanog.*, vol. 10.
- ARELLANO, G., ZULETA, D. y DAVIES, S.J., 2021. Tree death and damage: A standardized protocol for frequent surveys in tropical forests. *Journal of Vegetation Science* [en línea], vol. 32, no. 1. ISSN 1654-1103. [Consulta: 9 abril 2024]. DOI 10.1111/JVS.12981.
- BACCINI, A., GOETZ, S.J., WALKER, W.S., LAPORTE, N.T., SUN, M., SULLA-MENASHE, D., HACKLER, J., BECK, P.S.A., DUBAYAH, R., FRIEDL, M.A., SAMANTA, S. y HOUGHTON, R.A., 2012. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change* [en línea], vol. 2, no. 3. ISSN 1758-6798. [Consulta: 10 abril 2024]. DOI 10.1038/nclimate1354.
- BACCINI, A., WALKER, W., CARVALHO, L., FARINA, M., SULLA-MENASHE, D. y HOUGHTON, R.A., 2017. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science* [en línea], vol. 358, no. 6360. DOI 10.1126/science.aam5962.
- BELLASSEN, V. y LUYSSAERT, S., 2014. Carbon sequestration: Managing forests in uncertain times. *Nature*, vol. 506, no. 7487. ISSN 0028-0836.
- BLANC, L., ECHARD, M., HERAULT, B., BONAL, D., MARCON, E., CHAVE, J.R. y BARALOTO, C., 2009. Dynamics of aboveground carbon stocks in a selectively logged tropical forest. *Ecological Applications*.
- BLASER, J. y ZABEL VON FELTEN, A.M., 2016. Forest crime in the tropics. ISSN 3642546005.
- BRIENEN, R.J.W., PHILLIPS, O.L., FELDPAUSCH, T.R., GLOOR, E., BAKER, T.R., LLOYD, J., LOPEZ-GONZALEZ, G., MONTEAGUDO-MENDOZA, A., MALHI, Y., LEWIS, S.L., VÁSQUEZ MARTINEZ, R., et al., 2015. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, vol. 519, no. 7543. ISSN 1476-4687. DOI 10.1038/nature14283.

- CAMACHO CALVO, A.M., 2020. Documento técnico para la reactivación del Plan general de manejo del bosque en bosque natural. Guápiles, Costa Rica.
- CARRERA, F., 1993. Rendimientos y costos de las operaciones iniciales de manejo en un bosque primario de la zona atlántica de Costa Rica.
- CHAVE, J., RÉJOU-MÉCHAIN, M., BÚRQUEZ, A., CHIDUMAYO, E., COLGAN, M.S., DELITTI, W.B.C., DUQUE, A., EID, T., FEARNSSIDE, P.M., et al., 2014. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, vol. 20, no. 10, ISSN 13652486. DOI 10.1111/gcb.12629.
- CLARK, D.A., PIPER, S.C., KEELING, C.D. y CLARK, D.B., 2003. Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984-2000. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [en línea], vol. 100, no. 10, [consulta: 6 abril 2024]. ISSN 00278424. DOI 10.1073/PNAS.0935903100/SUPPL_FILE/5903TABLE5.PDF.
- CORBERA, E., ESTRADA, M., MAY, P., NAVARRO, G. y PACHECO, P., 2011. Rights to Land, Forests and Carbon in REDD+: Insights from Mexico, Brazil and Costa Rica. *Forests* [en línea], vol. 2, no. 1, ISSN 1999-4907. DOI 10.3390/f2010301.
- CURTIS, P.G., SLAY, C.M., HARRIS, N.L., TYUKAVINA, A. y HANSEN, M.C., 2018. Classifying drivers of global forest loss. *Science* [en línea], vol. 361, no. 6407, DOI 10.1126/science.aau3445.
- DE AVILA, A.L., RUSCHEL, A.R., DE CARVALHO, J.O.P., MAZZEI, L., SILVA, J.N.M., LOPES, J. do C., ARAUJO, M.M., DORMANN, C.F. y BAUHUS, J., 2015. Medium-term dynamics of tree species composition in response to silvicultural intervention intensities in a tropical rain forest. *Biological Conservation*, vol. 191, ISSN 00063207. DOI 10.1016/j.biocon.2015.08.004.
- DE MEIRA JUNIOR, M.S., PINTO, J.R.R., RAMOS, N.O., MIGUEL, E.P., GASPAR, R.D.O. y PHILLIPS, O.L., 2020. The impact of long dry periods on the aboveground biomass in a tropical forests: 20 years of monitoring. *Carbon Balance and Management*, vol. 15, no. 1, ISSN 17500680. DOI 10.1186/s13021-020-00147-2.
- DECRETO EJECUTIVO 34559, 2008. Estándares de Sostenibilidad para Manejo de Bosques Naturales: Principios, Criterios e Indicadores, Código de Prácticas y Manual de Procedimientos. *Diario la Gaceta, Costa Rica*, 8 ene [en línea]. [consulta: 21 agosto 2022]. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=63351&nValor3=72746&strTipM=TC.

- DIONISIO, Luiz Fernandes, SCHWARTZ, G., LOPES, J. do C. y OLIVEIRA, F. de A., 2018. Growth, mortality, and recruitment of tree species in an Amazonian rainforest over 13 years of reduced impact logging. *Forest Ecology and Management*, vol. 430, ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2018.08.024.
- DIONISIO, Luiz Fernandes Silva, SCHWARTZ, G., DO CARMO LOPES, J. y DE ASSIS OLIVEIRA, F., 2018. Growth, mortality, and recruitment of tree species in an Amazonian rainforest over 13 years of reduced impact logging. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 430, ISSN 0378-1127. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.024>.
- DIRECCIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO, 2019. PLAN NACIONAL DE DESCARBONIZACIÓN: GOBIERNO DE COSTA RICA 2018-2050. . S.I.:
- DIRECCIÓN DE CAMBIO CLIMÁTICO, 2020. Contribución Nacionalmente Determinada 2020. . S.I.:
- D'OLIVEIRA, M.V.N., OLIVEIRA, L.C., ACUÑA, M.H.A. y BRAZ, E.M., 2017. Twenty years monitoring growth dynamics of a logged tropical forest in Western Amazon. *Pesquisa Florestal Brasileira*, vol. 37, no. 92, ISSN 1809-3647. DOI 10.4336/2017.pfb.37.92.1398.
- EDWARDS, D.P., TOBIAS, J.A., SHEIL, D., MEIJAARD, E. y LAURANCE, W.F., 2014. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests. *Trends in ecology & evolution*, vol. 29, no. 9, ISSN 0169-5347.
- ESPÍRITO-SANTO, Fernando D B, GLOOR, M., KELLER, M., MALHI, Y., SAATCHI, S., NELSON, B., JUNIOR, R.C.O., PEREIRA, C., et al., 2014. Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance. *Nature Communications* [en línea], vol. 5, no. 1, ISSN 2041-1723. DOI 10.1038/ncomms4434.
- ESPÍRITO-SANTO, GLOOR, M., KELLER, M., MALHI, Y., SAATCHI, S., NELSON, B., JUNIOR, R.C.O., PEREIRA, C., et al., 2014. Size and frequency of natural forest disturbances and the Amazon forest carbon balance. *Nature Communications*, vol. 5, ISSN 20411723. DOI 10.1038/ncomms4434.
- ESQUIVEL-MUELBERT, A., BAKER, T.R., DEXTER, K.G., LEWIS, S.L., BRIENEN, R.J.W., FELDPAUSCH, T.R., LLOYD, J., MONTEAGUDO-MENDOZA, A., ARROYO, L., ÁLVAREZ-DÁVILA, E., et al., 2019. Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology* [en línea], vol. 25, no. 1, [consulta: 6 abril 2024]. ISSN 1365-2486. DOI 10.1111/GCB.14413.
- ESQUIVEL-MUELBERT, A., PHILLIPS, O.L., BRIENEN, R.J.W., FAUSET, S., SULLIVAN, M.J.P., BAKER, T.R., CHAO, K.-J., FELDPAUSCH, T.R., GLOOR, E., et al., 2020. Tree mode of death and mortality risk factors

- across Amazon forests. *Nature Communications* [en línea], vol. 11, no. 1, ISSN 2041-1723. DOI 10.1038/s41467-020-18996-3.
- FAHEY, T.J., WOODBURY, P.B., BATTLES, J.J., GOODALE, C.L., HAMBURG, S.P., OLLINGER, S. V. y WOODALL, C.W., 2010. *Forest carbon storage: Ecology, management, and policy*. junio 2010. S.l.: s.n.
- FAO, 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Global Forest Resources Assessment 2020: Terms and Definition FRA. *Global Forest Resources Assessment -Terms and Definitions* [en línea], Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/58864/en/>.
- FENG, Y., ZENG, Z., SEARCHINGER, T.D., ZIEGLER, A.D., WU, J., WANG, D., HE, X., ELSEN, P.R., CIAIS, P., XU, R., et al., 2022. Doubling of annual forest carbon loss over the tropics during the early twenty-first century. *Nature Sustainability* [en línea], vol. 5, no. 5, ISSN 2398-9629. DOI 10.1038/s41893-022-00854-3.
- FINEGAN, B. y CAMACHO, M., 1999. Stand dynamics in a logged and silviculturally treated Costa Rican rain forest, 1988-1996. *Forest Ecology and Management*, vol. 121, no. 3, ISSN 03781127. DOI 10.1016/S0378-1127(98)00550-7.
- FINEGAN, B., CAMACHO, M., DELGADO, D., GUILLEN, L., OROZCO, L., QUIRÓS, D. y ZAMORA, N., 1998. *Producción y conservación en bosques húmedos tropicales de la vertiente atlántica de Centroamérica: Resultados e implicaciones de una década de investigación en Costa Rica*. 1998. S.l.: s.n.
- FINEGAN, B., PEÑA-CLAROS, M., DE OLIVEIRA, A., ASCARRUNZ, N., BRET-HARTE, M.S., CARREÑO-ROCADADO, G., CASANOVES, F., DÍAZ, S., et al., 2015. Does functional trait diversity predict above-ground biomass and productivity of tropical forests? Testing three alternative hypotheses. *Journal of Ecology*, vol. 103, no. 1, ISSN 13652745. DOI 10.1111/1365-2745.12346.
- GOODMAN, R., PHILLIPS, O., DEL CASTILLO TORRES, D., FREITAS, L., CORTESE, S., MONTEAGUDO, A. y BAKER, T., 2013. Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, vol. 310, no. ISSN 0378-1127, DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.045>.
- GOURLET-FLEURY, S., MORTIER, F., FAYOLLE, A., BAYA, F., OUÉDRAOGO, D., BÉNÉDET, F. y PICARD, N., 2013. Tropical forest recovery from logging: a 24 year silvicultural experiment from Central Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 368, no. 1625, ISSN 0962-8436.
- GRACE, J., MITCHARD, E. y GLOOR, E., 2014. Perturbations in the carbon budget of the tropics. *Global Change Biology*, vol. 20, no. 10, ISSN 13652486. DOI 10.1111/gcb.12600.

- GRISCOM, B.W., BUSCH, J., COOK-PATTON, S.C., ELLIS, P.W., FUNK, J., LEAVITT, S.M., LOMAX, G., TURNER, W.R., et al., 2020. National mitigation potential from natural climate solutions in the tropics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* [en línea], vol. 375, no. 1794, [consulta: 16 julio 2022]. ISSN 14712970. DOI 10.1098/RSTB.2019.0126.
- HARRIS, N.L., GIBBS, D.A., BACCINI, A., BIRDSEY, R.A., DE BRUIN, S., FARINA, M., FATOYINBO, L., HANSEN, M.C., HEROLD, M., et al., 2021. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, vol. 11, no. 3, ISSN 17586798. DOI 10.1038/s41558-020-00976-6.
- HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R. y MENDOZA, C., 2020. *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. S.l.: Mcgraw-hill. ISBN 145627774X.
- HOLDRIDGE, L.R., 1982. *Ecología con base en zonas de vida*. IICA. San José, CR,
- HU, J., HERBOHN, J., CHAZDON, R.L., BAYNES, J. y VANCLAY, J.K., 2020. Above-ground biomass recovery following logging and thinning over 46 years in an Australian tropical forest. *Science of the Total Environment*, vol. 734, ISSN 18791026. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.139098.
- HUANG, M., PIAO, S., CIAIS, P., PEÑUELAS, J., WANG, X., KEENAN, T.F., PENG, S., BERRY, J.A., WANG, K. y MAO, J., 2019. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. *Nature ecology & evolution*, vol. 3, no. 5, ISSN 2397-334X.
- INSTITUTO METEOROLÓGICO NACIONAL (IMN), 2021. Inventario Nacional de emisiones por fuentes y absorción por sumideros de Gases de Efecto Invernadero Costa Rica, 1990-2017. Costa Rica:
- KIRILENKO, A.P. y SEDJO, R.A., 2007. Climate change impacts on forestry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, no. 50, ISSN 0027-8424.
- KÖHL, M., LASCO, R., CIFUENTES, M., JONSSON, Ö., KORHONEN, K.T., MUNDHENK, P., DE JESUS NAVAR, J. y STINSON, G., 2015. Changes in forest production, biomass and carbon: Results from the 2015 UN FAO Global Forest Resource Assessment. *Forest Ecology and Management*, vol. 352, ISSN 0378-1127.
- MARTIN, P.A., NEWTON, A.C., PFEIFER, M., KHOO, M.S. y BULLOCK, J.M., 2015. Impacts of tropical selective logging on carbon storage and tree species richness: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 356, ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2015.07.010.

- MAZZEI, L., SIST, P., RUSCHEL, A., PUTZ, F.E., MARCO, P., PENA, W. y FERREIRA, J.E.R., 2010. Above-ground biomass dynamics after reduced-impact logging in the Eastern Amazon. *Forest Ecology and Management*, vol. 259, no. 3, ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2009.10.031.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y ENERGÍA (MINAE), 2022. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2022-2026: Gobierno de Costa Rica Ministerio de Ambiente y Energía. S.I.:
- MITCHARD, E.T.A., 2018. The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature* [en línea], vol. 559, no. 7715, ISSN 14764687. DOI 10.1038/s41586-018-0300-2.
- MORRISON, L., MÉNAGER, M., FINEGAN, B., DELGADO, D., CASANOVES, F., AGUILAR SALAS, L.Á., CASTILLO, M., HERNÁNDEZ SÁNCHEZ, L.G., et al., 2021. Above-ground biomass storage potential in primary rain forests managed for timber production in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, vol. 497, no. June, ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2021.119462.
- MOUSALLI-KAYAT, G., 2015. *Métodos y diseños de investigación cuantitativa*. 2015. S.I.: Mérida.
- NAM, V.T., ANTEN, N.P.R. y VAN KUIJK, M., 2018. Biomass dynamics in a logged forest: the role of wood density. *Journal of plant research*, vol. 131, ISSN 0918-9440.
- NGUTE, A.S.K., SCHOEMAN, D.S., PFEIFER, M., VAN DER HEIJDEN, G.M.F., PHILLIPS, O.L., VAN BREUGEL, M., CAMPBELL, M.J., et al., 2024. Global dominance of lianas over trees is driven by forest disturbance, climate and topography. *Global Change Biology*, vol. 30, no. 1, ISSN 13652486. DOI 10.1111/gcb.17140.
- NINO PAGE, G.D.B.H.E.M.E.G.G.J.C.Piponiot., [sin fecha]. ForestData 0.2.0. How to use ForestData's corrections. [en línea]. [consulta: 10 abril 2024]. Disponible en: <https://ecofog.github.io/ForestData/articles/ForestData.html>.
- PANEL INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, I., 2023. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. . Geneva, Switzerland:
- PEARSON, T.R.H., BROWN, S., MURRAY, L. y SIDMAN, G., 2017. Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source. *Carbon Balance and Management* [en línea], vol. 12, no. 1, ISSN 1750-0680. DOI 10.1186/s13021-017-0072-2.
- PIPONIOT, C., SIST, P., MAZZEI, L., PEÑ A-CLAROS, M., PUTZ, F.E., RUTISHAUSER, E., SHENKIN, A., ASCARRUNZ, N., DE AZEVEDO,

- C.P., et al., 2016. Carbon recovery dynamics following disturbance by selective logging in Amazonian forests. , DOI 10.7554/eLife.21394.001.
- POORTER, L., VAN DER SANDE, M.T., THOMPSON, J., ARETS, E.J.M.M., ALARCÓN, A., ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, J., ASCARRUNZ, N., BALVANERA, P., et al., 2015. Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Global Ecology and Biogeography* [en línea], vol. 24, no. 11, DOI <https://doi.org/10.1111/geb.12364>.
- PRADO-JUNIOR, J.A., SCHIAVINI, I., VALE, V.S., ARANTES, C.S., VAN DER SANDE, M.T., LOHBECK, M. y POORTER, L., 2016. Conservative species drive biomass productivity in tropical dry forests. *Journal of Ecology*, vol. 104, no. 3, ISSN 13652745. DOI 10.1111/1365-2745.12543.
- PUTZ, F.E., ZUIDEMA, P.A., PINARD, M.A., BOOT, R.G.A., SAYER, J.A., SHEIL, D., SIST, P., ELIAS y VANCLAY, J.K., 2008. Improved Tropical Forest Management for Carbon Retention. *PLOS Biology* [en línea], vol. 6, no. 7, DOI 10.1371/journal.pbio.0060166.
- PUTZ, F.E., ZUIDEMA, P.A., SYNNOTT, T., PEÑA-CLAROS, M., PINARD, M.A., SHEIL, D., VANCLAY, J.K., SIST, P., GOURLET-FLEURY, S., GRISCOM, B., PALMER, J. y ZAGT, R., 2012. Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: The attained and the attainable. *Conservation Letters*, vol. 5, no. 4, ISSN 1755263X. DOI 10.1111/j.1755-263X.2012.00242.x.
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNUD). Costa Rica recibe US\$ 54 millones por sus esfuerzos para reducir la deforestación y acción por el clima. [en línea]. 2023 [consulta: 10 septiembre 2023]. Disponible en: <https://www.undp.org/es/comunicados-de-prensa/costa-rica-recibe-us-54-millones-por-sus-esfuerzos-para-reducir-la-deforestacion-y-accion-por-el-clima>.
- REDD+, 2021. Forest Carbon Partnership Facility (FCPF) Carbon Fund ER Monitoring Report (ER-MR) ER Program Name and Country. . S.I.:
- RÉJOU-MÉCHAIN, M., TANGUY, A., PIPONNIOT, C., CHAVE, J. y HÉRAULT, B., 2017. biomass: an R package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. *Methods in Ecology and Evolution* [en línea], vol. 8, no. 9, [consulta: 21 julio 2022]. ISSN 2041-210X. DOI 10.1111/2041-210X.12753.
- RIVETT, S.L., BICKNELL, J.E. y DAVIES, Z.G., 2016. Effect of reduced-impact logging on seedling recruitment in a neotropical forest. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 367, ISSN 0378-1127. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.022>.
- ROOPSIND, A., CAUGHLIN, T.T., VAN DER HOUT, P., ARETS, E. y PUTZ, F.E., 2018. Trade-offs between carbon stocks and timber recovery in

- tropical forests are mediated by logging intensity. *Global Change Biology*, vol. 24, no. 7, ISSN 13652486. DOI 10.1111/gcb.14155.
- RUTISHAUSER, E., HÉRAULT, B., BARALOTO, C., BLANC, L., DESCROIX, L., SOTTA, E.D., FERREIRA, J., KANASHIRO, M., MAZZEI, L., D'OLIVEIRA, M.V.N., DE OLIVEIRA, L.C., et al., 2015. Rapid tree carbon stock recovery in managed Amazonian forests. *Current Biology* [en línea], vol. 25, no. 18, ISSN 0960-9822. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.07.034>.
- SAATCHI, S.S., HARRIS, N.L., BROWN, S., LEFSKY, M., MITCHARD, E.T.A., SALAS, W., ZUTTA, B.R., BUERMANN, W., LEWIS, S.L., HAGEN, S., PETROVA, S., WHITE, L., SILMAN, M. y MOREL, A., 2011. Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [en línea], vol. 108, no. 24, DOI 10.1073/pnas.1019576108.
- SANCHEZ-AZOFEIFA, G.A., PFAFF, A., ROBALINO, J.A. y BOOMHOWER, J.P., 2007. Costa Rica's payment for environmental services program: intention, implementation, and impact. *Conservation biology*, vol. 21, no. 5, ISSN 0888-8892.
- SAN-JOSÉ, M., WERDEN, L., PETERSON, C.J., OVIEDO-BRENES, F. y ZAHAWI, R.A., 2021. Large tree mortality leads to major aboveground biomass decline in a tropical forest reserve. *Oecologia* [en línea], vol. 197, no. 3, ISSN 1432-1939. DOI 10.1007/s00442-021-05048-w.
- SASAKI, N., ASNER, G.P., PAN, Y., KNORR, W., DURST, P.B., MA, H.O., ABE, I., LOWE, A.J., KOH, L.P. y PUTZ, F.E., 2016. Sustainable management of tropical forests can reduce carbon emissions and stabilize timber production. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 4, no. AUG, ISSN 2296665X. DOI 10.3389/fenvs.2016.00050.
- SECRETARÍA REDD+, F., 2018. Estrategia Nacional REDD+ Costa Rica. . S.I.:
- SIERRA, R., CAMBRONERO, A. y VEGA, E., 2016. Patrones y factores de cambio de la cobertura forestal natural de Costa Rica, 1987-2013. *Recuperado el*, vol. 29,
- SIST, P., BLANC, L., MAZZEI, L., BARALOTO, C. y AUSSENAC, R., 2012. Current knowledge on overall post-logging biomass dynamics in Northern Amazonian forests. *Bois et Forêts des Tropiques* [en línea]. S.I.:
- SIST, P., MAZZEI, L., BLANC, L. y RUTISHAUSER, E., 2014. Large trees as key elements of carbon storage and dynamics after selective logging in the Eastern Amazon. *Forest Ecology and Management*, vol. 318, ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2014.01.005.

- SNIDER, A.G., PATTANAYAK, S.K., SILLS, E.O. y SCHULER, J.L., 2003. Policy innovations for private forest management and conservation in Costa Rica. *Journal of Forestry*, vol. 101, no. 5, ISSN 0022-1201.
- STAS, S.M., LE, T.C., TRAN, H.D., HOANG, T.T.H., VAN KUIJK, M., LE, A. Van, NGO, D.T., VAN OOSTRUM, A., PHILLIPS, O.L., RUTISHAUSER, E., SPRACKLEN, B.D., TRAN, T.T.A., LE, T.T. y SPRACKLEN, D. V., 2020. Logging intensity drives variability in carbon stocks in lowland forests in Vietnam. *Forest Ecology and Management*, vol. 460, ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2020.117863.
- TALBOT, J., LEWIS, S.L., LOPEZ-GONZALEZ, G., BRIENEN, R.J.W., MONTEAGUDO, A., BAKER, T.R., et al., 2014. Methods to estimate aboveground wood productivity from long-term forest inventory plots. *Forest Ecology and Management*, vol. 320, ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2014.02.021.
- THOMAS, S.C. y MARTIN, A.R., 2012. Carbon Content of Tree Tissues: A Synthesis. *Forests* [en línea], vol. 3, no. 2, ISSN 1999-4907. DOI 10.3390/f3020332.
- VIDAL, E., WEST, T.A.P. y PUTZ, F.E., 2016. Recovery of biomass and merchantable timber volumes twenty years after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 376, ISSN 0378-1127. DOI <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.003>.
- WALLBOTT, L., SICILIANO, G. y LEDERER, M., 2019. Beyond PES and REDD+: Costa Rica on the way to climate-smart landscape management? *Ecology and Society*, vol. 24, no. 1, ISSN 17083087. DOI 10.5751/ES-10476-240124.
- WEST, T.A.P., VIDAL, E. y PUTZ, F.E., 2014. Forest biomass recovery after conventional and reduced-impact logging in Amazonian Brazil. *Forest Ecology and Management* [en línea], vol. 314, no. 2014, ISSN 03781127. DOI 10.1016/j.foreco.2013.11.022.
- XU, L., SAATCHI, S.S., YANG, Y., YU, Y., PONGRATZ, J., BLOOM, A.A., BOWMAN, K., WORDEN, J., LIU, J. y YIN, Y., 2021. Changes in global terrestrial live biomass over the 21st century. *Science Advances*, vol. 7, no. 27, ISSN 2375-2548.
- ZULETA, D., ARELLANO, G., MULLER-LANDAU, H.C., MCMAHON, S.M., AGUILAR, S., BUNYAVEJCHEWIN, S., CÁRDENAS, D., CHANG-YANG, C.-H., DUQUE, A., MITRE, D., NASARDIN, M., PÉREZ, R., SUN, I.-F., YAO, T.L. y DAVIES, S.J., 2022. Individual tree damage dominates mortality risk factors across six tropical forests. *New Phytologist* [en línea], vol. 233, no. 2, DOI <https://doi.org/10.1111/nph.17832>.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente:			
Intervención forestal	Finegan (1992), las técnicas de manejo forestal influyen y facilitan el establecimiento, crecimiento, supervivencia y mortalidad de las especies forestales del bosque.	Tratamientos: - Aprovechado (Ap) - Aprovechado y tratado silviculturalmente (ApTS) - Testigo o sin intervención (T)	Individuos reclutas Individuos sobrevivientes Individuos muertos por aprovechamiento y perturbación natural
Tiempo	Es el tiempo donde se evaluó los tratamientos del bosque primario intervenido.	30 años (1992-2021)	Años intercensales: 1992-1993; 1993- 1996; 1996-1997; 1997-1998; 1998-2000; 2000-2006; 2006-2010; 2010-2021
Variable dependiente:			
Ganancia de carbono aéreo	Las acciones de perturbación de los bosques por deforestación y/o degradación, genera emisiones de carbono a la atmosfera (Mitchard 2018). El manejo forestal según la intensidad de perturbación que permite que continúe	- Aprovechado (Ap) - Aprovechado y tratado silviculturalmente (ApTS) - Testigo o sin intervención (T)	Crecimiento de árboles supervivientes Reclutamiento Cambios netos
Pérdida de carbono aéreo	los procesos de la dinámica de carbono (Martin et al. 2015; Piponiot et al. 2016).		Mortalidad (pérdida) Diferentes condiciones de mortalidad

Anexo 2. Matriz de consistencia de proyecto de investigación

TÍTULO: “Efectos del manejo forestal sostenible en la dinámica del carbono durante tres décadas, provincia Limón, Costa Rica”

NOMBRE DE TESISISTA: Paty Galvez Cusiquispe

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables/Indicadores	Metodología
<p>General ¿Cómo cambia la dinámica de carbono aéreo en un bosque con manejo forestal sostenible durante tres décadas?</p>	<p>General Evaluar los efectos generados por el manejo forestal sostenible en la dinámica del carbono aéreo durante un período de tres décadas.</p>	<p>General La trayectoria del carbono aéreo en áreas con manejo forestal cambia a lo largo de tres décadas. La dinámica del carbono aéreo en áreas con manejo forestal cambia a lo largo de tres décadas.</p>	<p>Independiente: - Intervenciones forestales: Bosque primario intervenido con tratamientos Aprovechado (Ap), Aprovechado y tratado silviculturalmente (ApTS) y Testigo o sin intervención (T) - Tiempo: Son los 30 años de evaluación de los tratamientos.</p>	<p>Tipo de investigación: Cuantitativa descriptiva y comparativa</p> <p>Diseño de investigación: De campo y experimental</p> <p>Población y muestra: - 09 PMM (03 Ap, ApTS y T) - Base de datos de evaluación de árboles y palmas \geq a 10 cm DAP.</p> <p>Técnicas de investigación: Estimación de Biomasa aérea según Chave et al (2014), por medio de paquete BIOMASS. Estimación de carbono aéreo según paquete BIOMASS Estimación de la ganancia y pérdida</p>
<p>Específicos ¿Cuál es la contribución del reclutamiento y crecimiento árboles supervivientes en la ganancia de carbono en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas?</p>	<p>Específicos Calcular la contribución del reclutamiento y crecimiento de árboles supervivientes en la ganancia de carbono aéreo en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas.</p>	<p>Específicas La ganancia de carbono por reclutamiento y crecimiento de supervivientes aumenta por el aprovechamiento y los tratamientos silviculturales respecto al tratamiento testigo a lo largo de las tres décadas.</p>	<p>Dependiente - Ganancia de carbono aéreo: Producto de reclutamiento y el crecimiento de árboles supervivientes - Pérdida de carbono aéreo: Muerte de árboles en los tratamientos.</p>	

<p>¿Cuál es el aporte de la mortalidad de árboles, con la pérdida de carbono aéreo en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas?</p>	<p>Determinar el aporte de la mortalidad de árboles en la pérdida de carbono aéreo en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas.</p> <p>Adicionalmente, Identificar las diferentes condiciones de mortalidad que contribuyen en la pérdida de carbono en un bosque primario intervenido a lo largo de tres décadas.</p>	<p>Las intervenciones de aprovechamiento y los tratamientos silviculturales no generan pérdida de carbono aéreo por mortalidad mayor a áreas sin intervención a lo largo de las tres décadas</p>		<p>según propuesto por Finegan et al (2015).</p> <p>Procesamiento de Datos:</p> <p>Análisis comparativos de ANOVA con modelos lineales generales (MGM) en el software Navure (Navure Team 2023) para la ganancia de C aéreo por relcutas, crecimiento de supervivientes, total y cambio neto.</p> <p>Así mismo, análisis comparativo de ANOVA con con modelos lineales generales (MGM) en el software Navure (Navure Team 2023) para la perdida de C aéreo por mortalidad.</p>
--	---	--	--	---

Anexo 3. Carta de compromiso para el uso de base de datos



CARTA DE COMPROMISO

Turrialba, 08 de junio de 2023

Dr. Rosel Quispe Herrera
Decano de la Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios- UNAMAD

Tengo el agrado de dirigirme a usted, previo saludo y por intermedio de la presente yo Ph.D. Bryan Finegan, profesor-investigador del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza-CATIE, acepto y me comprometo a participar como co-asesor del trabajo de investigación de pregrado de forma permanente, de acuerdo con el reglamento de grados y título de vuestra institución. La investigación llevará como título "Efectos del manejo forestal sostenible en la dinámica del carbono durante tres décadas, provincia Limón, Costa Rica", el cual será desarrollado por la bachiller Paty Galvez Cusiquispe con DNI 48108739, quien ha concluido sus estudios en la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios (UNAMAD). Por consiguiente, declaro que la mencionada cuenta con mi respaldo para llevar a cabo la propuesta de investigación.

Asimismo, declaro que es de mi conocimiento que mi experiencia académica y profesional será tomada en cuenta durante la evaluación de la propuesta. Es todo cuanto informo a usted, para su consideración y fines pertinentes.

Atentamente,

Ph.D. Bryan Finegan
Docente principal-CATIE