



ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL PATRIMONIO FORESTAL DE LA EMPRESA AGROFORESTAL SIERRA CRISTAL

CLIMATE CHANGE MITIGATION ALTERNATIVES FOR THE FOREST ASSETS OF THE SIERRA CRISTAL AGROFORESTRY COMPANY

C. CATANARES LANDAVE^{1*}, A. ÁLVAREZ RUBIO², Y. ÁLVAREZ ZAPATA², A. MARTÍNEZ NIEVES³

¹Unidad Científico Tecnológica de Base Estación Experimental Agro-Forestal III Frente, Santiago de Cuba, Cuba.

²Empresa Agroforestal Sierra Cristal, Mayarí Arriba II Frente, Santiago de Cuba, Cuba.

³Servicio Estatal Forestal, Municipio II Frente, Delegación Municipal de la Agricultura, Cuba.

*Autor para correspondencia: catanareslandave@gmail.com

RESUMEN

La mitigación del cambio climático mediante la gestión forestal sostenible es crucial para contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero. Este estudio evaluó el potencial de retención de carbono en el patrimonio forestal de la Empresa Agroforestal Sierra Cristal (Cuba) y propuso alternativas de mitigación. Se analizaron 21,882.1 ha de bosques (naturales y artificiales) mediante el sistema SUMFOR v. 3.03 para cuantificar el carbono almacenado en biomasa, necromasa y suelo. Los resultados mostraron que los bosques naturales retuvieron 3,119.8 Mt de carbono (equivalente a 19,826.4 Mt de CO₂), destacándose los pinares con 590.49 tC/ha. En plantaciones, *Pinus cubensis* presentó la mayor retención (369.94 tC/ha). La proyección a 10 años indicó un aumento a 35,914.1 MtC bajo la gestión actual. Entre las alternativas evaluadas, incrementar el Incremento Medio Anual (IMA) en bosques artificiales en un 29% (50 ha/año) fue la más efectiva, con un costo de 2,348.3 \$/tCO₂ y un acumulado de 36,444.1 MtC. Se concluyó que los bosques naturales son los mayores sumideros de carbono y que el IMA en plantaciones es la estrategia óptima para maximizar la retención con menores costos.

Palabras clave: sumidero, biomasa, *Pinus cubensis*, proyección, costos

ABSTRACT

Climate change mitigation through sustainable forest management is crucial to counteract greenhouse gas emissions. This study evaluated the carbon sequestration potential of the Sierra Cristal Agroforestry Company (Cuba) and proposed mitigation alternatives. A total of 21,882.1 ha of forests (natural and man-made) were analyzed using the SUMFOR v. 3.03 system to quantify carbon stored in biomass, necromass, and soil. The results showed that natural forests retained 3,119.8 Mt of carbon (equivalent to 19,826.4 Mt of CO₂), with pine forests being the most prevalent with 590.49 tC/ha. In plantations, *Pinus cubensis* had the highest carbon sequestration (369.94 tC/ha). The 10-year projection indicated an increase to 35,914.1 MtC under current management. Among the alternatives evaluated, increasing the Average Annual Increment (AAI) in man-made forests by 29% (50 ha/year) was the most effective, with a cost of \$2,348.3/tCO₂ and a cumulative carbon of 36,444.1 MtC. It was concluded that natural forests are the largest carbon sinks and that AAI in plantations is the optimal strategy to maximize carbon sequestration at the lowest costs.

Keywords: sink, biomass, *Pinus cubensis*, projection, costs

INTRODUCCIÓN

En los últimos 150 años, el desarrollo socioeconómico de la humanidad ha estado marcado por una industrialización acelerada y un consumo desmedido de recursos naturales, lo que ha provocado un grave deterioro ambiental. La quema masiva de hidrocarburos, principal fuente de energía desde la Revolución Industrial, ha liberado enormes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero

a la atmósfera. A esto se suma la deforestación indiscriminada, especialmente en regiones tropicales, que reduce la capacidad de los ecosistemas para absorber CO₂, y el cambio de uso del suelo para actividades agrícolas y urbanas, que altera los ciclos naturales. Estos factores han intensificado el calentamiento global, lo que genera consecuencias como el aumento de temperaturas, el derretimiento de los glaciares y la acidificación de los océanos (B. A. Álvarez & Mercadet, 2017).

Recibido: 03/12/2021

Aceptado: 15/12/2021



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



El reforzamiento del efecto invernadero, causado por la acumulación de gases como el CO₂, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), ha alterado el equilibrio climático del planeta. A diferencia de los cambios naturales ocurridos en el pasado, este proceso se ha desarrollado a una velocidad sin precedentes, superando la capacidad de adaptación de muchas especies y ecosistemas. Además, el calentamiento atmosférico ha exacerbado fenómenos meteorológicos extremos, como huracanes, sequías e inundaciones, lo que afecta especialmente a las poblaciones más vulnerables. A pesar de los avances tecnológicos y las iniciativas globales para reducir emisiones, el modelo económico actual sigue dependiendo en gran medida de combustibles fósiles, lo que dificulta la mitigación del cambio climático y plantea serios desafíos para el futuro de la humanidad (B. A. Álvarez & Mercadet, 2017).

El inventario de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se ha realizado en el país de forma bianual desde 1990. Este registro incluye las emisiones y remociones asociadas al sector forestal, el cual mostró una tendencia creciente en la superficie cubierta de bosques entre 1990 y 2008. Durante ese período, las extracciones totales de productos madereros fueron inferiores al incremento medio anual del volumen informado, lo que resultó en una remoción promedio de 15.3 millones de toneladas de CO₂ atmosférico por año (A. Álvarez & Mercadet, 2015).

El sector forestal se consolidó como el único sumidero neto de carbono en Cuba durante 18 años consecutivos. Este acumuló un total de 290.5 millones de toneladas de CO₂ removidas de la atmósfera. Su capacidad de absorción ha permitido contrarrestar parcialmente las emisiones generadas por otros sectores económicos del país. Los incendios forestales representan el principal factor que incide en la emisión de gases de efecto invernadero dentro del sector. Estos eventos liberan CO₂ y otros GEI al quemar la biomasa, lo que agrava el problema climático (A. F. Álvarez & Mercadet, 2012).

En este estudio se analizó el caso de la Empresa Agroforestal Sierra Cristal para evaluar el potencial de retención de carbono en su patrimonio. Además, se simuló y definieron alternativas de mitigación que contribuyan a mantener o incrementar los niveles de carbono almacenado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización y características generales

La Empresa Agroforestal (EAF) Sierra Cristal se ubica en la provincia de Santiago de Cuba, específicamente en el municipio II Frente. Su extensión territorial abarca 11,787.68 km², lo que la convierte en la segunda empresa de mayor superficie en la Isla. Los límites geográficos incluyen la provincia de Holguín al norte, Guantánamo al este, el municipio San Luis al oeste y Songo La Maya al sur (Figura 1).



Figura 1. Localización de la Empresa Agroforestal (EAF) Sierra Cristal.

Los suelos presentes en el área presentan una amplia variedad y se clasifican en cuatro tipos principales: Suelos Pardos sin Carbonatos, Pardos con Carbonatos, Húmico Carbonato y Ferralítico Rojo, según Aguilera & Guillart (2016). Las temperaturas registradas varían entre 16°C y 29°C, mientras que las precipitaciones promedio alcanzan los 189 mm, de acuerdo con Pérez & Ramírez (2006). La superficie total de la empresa es de 24,510.7 ha, de las cuales 21,882.1 ha corresponden al patrimonio forestal, lo que representa un 89.3% del área (Tabla 1).

Estructura organizativa

La actividad forestal de la EAF Sierra Cristal se gestiona a través de tres Unidades Económicas de Base (UEB): la UEB Silvícola-Extractivo Mayarí, la UEB Silvícola-Extractivo 13 de Agosto y la UEB Industria Forestal. Estas unidades coordinan las operaciones relacionadas con la extracción, manejo y procesamiento de los recursos forestales. La estructura garantiza una gestión eficiente y especializada en cada etapa del proceso productivo.

Metodología y procesamiento de datos

La información utilizada en este trabajo fue proporcionada directamente por la Empresa Agroforestal (Tabla 2). Para su análisis, se empleó el sistema automatizado SUMFOR v. 3.03, desarrollado por Álvarez & Mercadet (2017), el cual permitió determinar las retenciones de carbono por componente y por depósito. Además, se evaluaron diferentes alternativas junto con sus costos asociados, así como el Indicador 3.5 de Manejo Sostenible, que mide la contribución a la reducción del efecto invernadero, según lo establecido por Herrero (2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Carbono retenido por las plantaciones establecidas de la EAF Sierra Cristal

La Tabla 3 muestra los valores del potencial de retención de carbono en las plantaciones establecidas por la Empresa.

Tabla 1. Composición general del patrimonio forestal administrado por la empresa.

No	Indicador	Área
1	Superficie cubierta de bosques (ha)	21, 882.1
	Bosques Naturales (ha)	10,492.1
	Bosques Artificiales Establecidos (ha)	11,390.0
2	Bosques Artificiales en desarrollo (ha)	1,933.6
3	Superficie por reforestar (ha)	347.5
4	Superficie inforestal (ha)	347.5
	Pantanos (ha)	0.0
	Pastizales (ha)	300.0
	Tierras agrícolas (ha)	47.5
5	Superficie Total de la Empresa	24,510.7

Fuente: Dinámica Forestal Sierra Cristal (Pérez & Ramírez, 2006).

La mayor proporción de esta retención total se concentra en el suelo, donde las especies *Pinus cubensis* Griseb, *Cedrela odorata* L y *Taliparitis elatum* (Sw) presentan los mayores aportes. Este resultado se debe a que estas especies ocupan la mayor superficie (ha), aunque *Pinus cubensis* Griseb destaca en la relación carbono/ha.

Carbono retenido por los bosques naturales en la EAF Sierra Cristal (2017)

Por formación natural

Las formaciones naturales almacenan la mayor cantidad de carbono en la biomasa y los suelos, con valores de 150 y 2,879.8 Mt, respectivamente (Tabla 4). Entre las cinco formaciones informadas, los Pinares registran los niveles más altos de carbono retenido en el suelo y en el promedio de tC/ha. Por otro lado, los bosques Scf. Calizo y Scf. Ácido presentan una mayor retención de carbono en la biomasa.

Retención de carbono por categoría de bosques naturales

Por categoría

Estas categorías de manejo retienen un promedio de 247.05 tC/ha en sus bosques, con la mayor cantidad de carbono almacenada en el suelo y la biomasa. Los bosques protectores de agua y suelo muestran los valores más altos de carbono total retenido, mientras que los bosques productores alcanzan 63.5 Mt en biomasa, con un promedio de 403.63 t/ha (Tabla 5).

Componentes del Patrimonio Forestal

Los bosques naturales retienen la mayor cantidad de carbono en la biomasa (150.0 Mt) y el suelo (2,879.9 Mt), lo

Tabla 2. Caracterización de la gestión técnica de la EAF Sierra Cristal

Indicador	Valor
Superficie promedio anual de plantación (ha):	460.00
Supervivencia promedio de los bosques artificiales (%):	89.00
Logro promedio de las plantaciones (%):	86.00
Superficie promedio anual de áreas quemadas (ha):	0.00
Volumen promedio anual extraído por tratamiento./raleos (m³):	7,050.00
Tratamiento/raleos en plantaciones (%):	30.00
Tratamiento/raleos en bosques naturales (%):	70.00
Superficie promedio anual de talas rasas (ha):	0.00
Talas rasas en plantaciones (%):	0.00
Talas rasas en bosques naturales (%):	0.00
Volumen promedio anual extraído por otras talas (m³):	1,900.00
En plantaciones establecidas (%):	18.00
En bosques naturales (%):	82.00
Incremento medio anual de los bosques naturales (m³/ha/año):	3.5
Incremento medio anual de las plantaciones (m³/ha/año):	7.30

Fuente: Informe Técnico Sierra Cristal (Pérez & Ramírez, 2006).

que representa un total de 3,119.8 Mt. Este volumen equivale a 19,826.4 Mt de CO₂ removido de la atmósfera. Si la Empresa mantiene su patrimonio y gestión técnica actual durante los próximos 10 años (2017-2027), se proyecta un aumento en la retención de carbono hasta 35,914.1 Mt. Los bosques artificiales establecidos contribuirán con 25,498.0 Mt y los bosques naturales con 10,373.3 Mt (Figura 2).

Evaluación del Indicador 3.5 de Manejo Sostenible

La gestión del patrimonio forestal por parte del administrador genera una Contribución Sobresaliente a la mitigación del cambio climático, según el Indicador 3.5.

Alternativas de mitigación

El sistema SUMFOR V 3.03 propone 10 alternativas, de las cuales la Empresa seleccionó dos: el aumento del Incremento Medio Anual (IMA) de bosques artificiales en un 29% (50 ha) y el Aumento Corriente Anual (ICA) de bosques naturales en un 13% (80 ha), ambas en un período de 10 años. Entre estas, el IMA presenta el mejor resultado en retención de carbono, con un acumulado de 36,444.1 MtC al finalizar el período (Tabla 6).

La Tabla 7 demuestra que el IMA requiere menos gastos y, al mismo tiempo, aporta el mayor aumento en carbono retenido. Además, el análisis de costos anuales y promedio confirma que el IMA es la alternativa más económica, como se detalla en la Tabla 8.

Además, el análisis de costos anuales y promedio confirma que el IMA es la alternativa más económica, como se detalla en la Tabla 8.

Tabla 3. Retención de carbono por las plantaciones establecidas.

Especies	Acumulación de Carbono por Especie (Mt). Plantaciones Establecidas					Promedio (t/ha)
	Área	Biomasa	Necromasa	Suelo	Total	
Algarroba del país	127.40	1.1	1.1	15.7	17.9	140.28
Almendra	1.0	0	0	0.1	0.2	174.05
Ateje	2.0	0	0	0.2	0.3	146.89
Bambú	724.30	3.1	6.3	89.1	98.5	136.04
Baría	503.40	6.4	4.2	61.9	72.5	144.06
Bijáguara	897.20	5.5	7.6	110.4	123.4	137.55
Cabo de hacha	3.0	0	0	0.4	0.4	136.69
Caoba africana	37.90	0.1	0.3	4.7	5.1	133.58
Caoba antillana	158.90	0.7	1.4	19.5	21.6	135.89
Caoba de Honduras	1,005.90	4.1	8.6	123.7	136.4	135.57
Cedro	1,406.10	7.2	12.1	173.8	192.3	136.74
Dagame	10.0	0.3	0.1	1.2	1.6	159.64
Eucaliptos	197.90	0.8	1.7	24.3	26.9	135.79
Ipil-ipil	988.30	7.3	8.4	121.6	137.2	138.80
Majaguas	1,323.80	10.0	11.2	162.8	184.1	139.05
Ocuje	280.40	1.8	2.5	34.5	38.8	138.41
Palma Real	10.90	0	0.1	1.3	1.5	134.03
Pino Mayarí	1,781.70	18.9	15.3	625.0	659.1	369.94
Pino macho	205.00	0.5	1.8	59.1	61.4	299.49
Piñón florido	230.90	0.1	2.0	28.4	30.5	132.15
Roble Blanco	0.50	0	0	0.1	0.1	154.39
Robles	0.50	0	0	0.1	0.1	146.87
Salvadera	2.50	0	0	0.3	0.3	133.17
Soplillo	778.20	2.5	6.4	95.7	104.6	134.46
Teca	117.50	0.7	1.0	14.5	16.2	137.86
Yaba	35.60	0.3	0.3	4.4	4.9	138.93
Yarúa	313.70	2.4	2.9	38.6	43.9	139.80
Yaya	4.00	0.2	0	0.5	0.7	181.63
Otras especies	239.50	0.3	2.0	29.5	31.8	132.61
TOTAL	11,390.00	74.3	97.3	1,841.4	2,012.3	155.32

Tabla 4. Retención de carbono por formación.

Formación	Acumulación de Carbono por Formación (Mt):				Promedio(t/ha)
	Biomasa	Necromasa	Suelo	Total	
Charrascal	13.0	0.3	3.7	4.0	131.99
Pinar	42.4	30.5	2,026.7	2,099.6	590.49
Pluvilsilva de Montaña	11.6	8.2	116.3	136.1	143.88
Sef. ácido	45.5	33.3	482.8	561.9	142.14
Sef. calizo	50.5	17.4	250.3	318.3	156.38
TOTAL	150.0	89.7	2,879.8	3,119.9	232.97

Tabla 5. Acumulación de Carbono por Categoría (MtC)

Categoría	Biomasa	Necromasa	Suelo	Total	Promedio(t/ha)
Productor	63.5	26.7	1,166.9	1,257.1	403.63
Protector de Agua y Suelos	47.2	49.5	1,483.6	1,680.3	273.14
Protector de Flora y Fauna	21.8	4.2	94.1	120.1	243.83
Manejo Especial	11.6	8.2	116.3	136.1	143.88
Recreativo	6.0	1.3	18.9	26.3	170.76
TOTAL	150.1	89.9	2,879.8	3,219.9	247.05

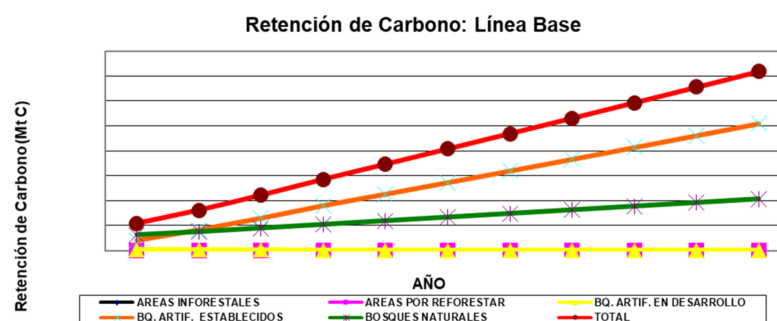


Figura 2. Línea Base.

Tabla 6. Variación general del Carbono retenido por alternativas seleccionadas (MtC).

#	ALTERNATIVAS	AÑOS					
		2017	2018	2019	2020	2021	2022
0	Línea Base	5,407.2	8,092.6	11,090.7	14,280.2	17,317.4	20,375.4
1	Aumento IMA Bosques Artificiales	5,407.2	8,101.6	11,117.9	14,334.9	17,409.2	20,514.1
2	Aumento ICA Bosques Naturales	5,407.2	8,115.6	11,142.5	14,366.7	17,444.4	20,548.9

Tabla 6. (continuación) Variación general del carbono por alternativas seleccionadas (MtC)

#	ALTERNATIVAS	AÑOS					Dif. Con línea Base (MtC)
		2023	2024	2025	2026	2027	
0	Línea Base	23,450.0	26,537.1	29,643.6	32,769.2	35,914.1	30,506.9
1	Aumento IMA Bosques Artificiales establecidos	23,645.7	26,800.2	29,984.6	33,199.2	36,444.1	31,036.9
2	Aumento ICA Bosques Naturales	23,676.0	26,821.9	29,993.2	33,190.0	36,412.4	20,033.6

Tabla 7. Gasto anual y gasto total por alternativa de mitigación (x 1000 \$)

#	Alternativas de Mitigación	Años					
		0	1	2	3	4	5
1	Aumento IMA Bosques Artificiales	0.0	456,32	456,32	456,32	456,32	456,32
2	Aumento ICA Bosques Naturales	0.0	1,113	1,113	1,113	1,113	1,113

Tabla 7. (Continuación). Gasto anual y gasto total por alternativa de mitigación (x 1000 \$)

#	Alternativas de Mitigación	Años					Gasto Total
		6	7	8	9	10	
1	Aumento IMA Bosques Artificiales	456,32	456,32	456,32	456,32	456,32	4,563
2	Aumento ICA Bosques Naturales	1,113	1,113	1,113	1,113	1,113	11,13

Tabla 8. Costo anual y costo promedio por alternativa de mitigación (\$/tCO₂).

#	Alternativas de Mitigación	Años					
		0	1	2	3	4	5
1	Aumento IMA Bosques Artificiales	0.00	184,082.94	61,426.82	30,580.43	18,230.15	12,063.68
2	Aumento ICA Bosques Naturales	0.00	177,172.08	78,742.23	47,205.02	32,138.14	23,522.77

Tabla 8. (Continuación). Costo anual y costo promedio por alternativa de mitigación (\$/tCO₂).

#	Alternativas de Mitigación	Años					Costo Promedio
		6	7	8	9	10	
1	Aumento IMA Bosques Artificiales	8,549.08	6,359.63	4,905.40	3,891.50	3,157.22	2,348.3
2	Aumento ICA Bosques Naturales	18,053.45	14,332.66	11,672.85	9,699.00	8,190.53	6,092.1

CONCLUSIONES

1. Los bosques naturales son los que mayor contribución tienen en el total de carbono retenido.
2. De las especies en plantaciones la que más aporta al total del carbono retenido es *Pinus cubensis* Griseb.
3. La línea base de carbono puede ser considerada como el plan de retención de carbono de la empresa para el período de 10 años, lo que permite a la empresa ejecutar y valorar su implementación y realizar los manejos que necesita el bosque para incrementarlo.
4. La evaluación del indicador 3.5 de Manejo Sostenible indica que el teniente presenta una contribución sobresaliente a la mitigación del cambio climático mediante el manejo que realiza del patrimonio forestal que administra.
5. La alternativa que más aumenta el carbono retenido, de menos gasto y menor costo es el incremento del IMA en los bosques artificiales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, C. M., & Guillart, C. R. (2016). *Estudio se Suelos de la Empresa Agroforestal Sierra Cristal* (p. 14). Dirección Provincial de Suelos.
- Álvarez, A. F., & Mercadet, A. (2012). *El sector forestal cubano y el cambio climático*. Instituto de Investigaciones Agro-Forestales, Ministerio de la Agricultura.
- Álvarez, A., & Mercadet, A. (2015). El programa forestal cubano de enfrentamiento al cambio climático. *Revista Agricultura Orgánica*, 21(1), 11-15.
- Álvarez, B. A., & Mercadet, A. (2017). *Sistema automatizado SUMFOR v-3.03* (p. 64) [Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Del Sector Forestal; Programa Nacional: Cambio climático en Cuba: Impactos. Mitigación y Adaptación.]. Instituto de Investigaciones Agro-Forestales.
- Herrero, J. A. (2005). *Criterios e indicadores de manejo forestal sostenible. Una visión de futuro* (Agrinfor, p. 55). Ministerio de la Agricultura.
- Pérez, J. L., & Ramírez, A. (2006). *Proyecto de Ordenación (2006-2017)*. Empresa Sierra Cristal.